

HERNANDO ALFONSO LARA PALMA

Determinação de Parâmetros Elásticos e de Resistência e a Influência da Madeira nas Propriedades de Compensados de ***Pinus elliottii*** Engelm. e ***Pinus taeda*** L.

Tese apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná como requisito parcial para a obtenção do título de "Doutor em Ciências Florestais".

Orientador: Prof. Dr. Sidón Keinert Junior

CURITIBA
1994


MINISTERIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
COORDENAÇÃO DO CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL

P A R E C E R

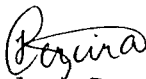
Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal para realizar a arguição da Tese de Doutorado apresentada pelo candidato HERNANDO ALFONSO LARA PALMA, sob o título "DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS ELÁSTICOS E DE RESISTÊNCIA E A INFLUÊNCIA DA MADEIRA NAS PROPRIEDADES DE COMPENSADOS DE *Pinus elliottii* Engelm. e *Pinus taeda* L.", para obtenção do grau de Doutor em Ciências Florestais - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná. Área de concentração em **TECNOLOGIA E UTILIZAÇÃO DE PRODUTOS FLORESTAIS**, após haver analisado o referido trabalho e arguido o candidato, são de parecer pela "APROVAÇÃO" da Tese, com média final: (8,8), correspondente ao conceito: (A).

CRITÉRIO "A" ou "B" 7,0 a 8,5 = B 8,6 a 10,0 = A

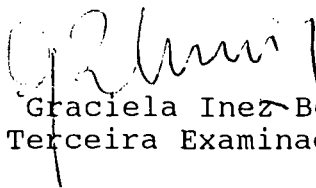
Curitiba, 23 de junho de 1994



Prof. Dr. Ivaldo Pontes Jankowsky
Primeiro Examinador



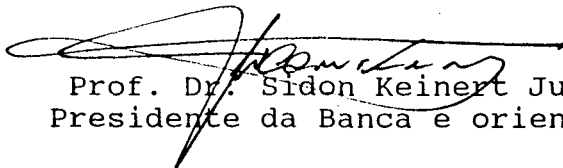
Pesq. Dr. José Carlos Duarte Pereira
Segundo Examinador



Profa. Dra. Graciela Inez Bolzon de Muniz
Terceira Examinadora



Prof. Dr. Setsuo Iwakiri
Quarto Examinador



Prof. Dr. Sidon Keinert Junior
Presidente da Banca e orientador

A meu filho Diego

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Dr. Sidón Keinert Junior, pela orientação e incentivo constantes na realização deste trabalho.

Ao Engenheiro Florestal Luiz Alberto Blanco Jorge do Departamento de Ciências Florestais da Universidade Estadual Paulista - UNESP, pelo valioso apoio durante o processamento e a análise dos dados.

Aos Professores Graciela I.B. de Muñiz, Jorge Matos e Edvá O. Brito por suas sugestões e apoio recebidos.

A Eng. Florestal Gisele Trevisan Lara, pelo valioso auxílio na revisão e conclusão do presente trabalho.

À coordenação do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal da Universidade Federal do Paraná.

Aos Professores e funcionários do Curso de Engenharia Florestal da Universidade Federal do Paraná.

Aos demais colegas, que, direta ou indiretamente, colaboraram para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

	LISTA DE FIGURAS.....	vii
	LISTA DE TABELAS.....	xi
	<u>RESUMO</u>	xiv
	<u>ABSTRACT</u>	xv
1	<u>INTRODUÇÃO</u>	1
2	<u>REVISÃO DE LITERATURA</u>	4
2.1	PRODUTOS COMPOSTOS DE MADEIRA.....	4
2.1.1	Compostos laminados de madeira.....	5
2.2	COMPENSADO	6
2.2.1	Histórico, definição e classificação	6
2.2.2	Propriedades da laminação cruzada	7
2.3	INFLUÊNCIA DA MADEIRA NAS PROPRIEDADES DE RIGIDEZ E RESIS- TÊNCIA DO COMPENSADO	12
2.3.1	Considerações gerais	12
2.3.2	Estrutura da madeira.....	13
2.3.2.1	Anisotropia da madeira.....	13
2.3.2.2	Planos de referência da madeira.....	15
2.3.3	Ortotropia na madeira.....	16
2.3.3.1	Considerações gerais	16
2.3.3.2	Tensões e deformações	17
2.3.3.3	Lei de Hooke	19
2.3.3.4	Lei de Hooke para materiais ortotrópicos	19
2.4	PARÂMETROS ELÁSTICOS E DE RESISTÊNCIA DO COMPENSADO.....	22
2.4.1	Considerações gerais	22
2.4.2	Ortotropia em compensados.....	24
2.4.3	Determinação das propriedades de elasticidade e resistência em compensados	25
2.4.4	Fatores que influenciam nas propriedades do compensado	47

3	<u>MATERIAL E MÉTODOS</u>	52
3.1	ESPÉCIES ESTUDADAS.....	52
3.2	AMOSTRAGEM E COLETA DO MATERIAL	52
3.3	ESTUDO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DA MADEIRA.....	54
3.3.1	Determinação das propriedades mecânicas.....	55
3.3.2	Determinação da massa específica.....	59
3.4	FABRICAÇÃO DE COMPENSADOS	59
3.4.1	Obtenção de lâminas	59
3.4.2	Laminação	61
3.4.3	Secagem das lâminas	61
3.5	CONFECÇÃO DOS COMPENSADOS.....	61
3.6	AVALIAÇÃO DOS PAINÉIS	63
3.7	ENSAIOS DE FLEXÃO ESTATICA.....	65
3.7.1	Flexão convencional.....	65
3.7.2	Cálculo teórico dos módulos de elasticidade efetivos.....	66
3.7.2.1	Cálculo considerando toda a seção transversal (Método exato)	66
3.7.2.2	Cálculo teórico dos módulos de elasticidade efetivos, considerando apenas as lâminas com fibras paralelas ao vão	70
3.7.3	Cálculo teórico da resistência máxima à flexão	70
3.7.4	Cálculo teórico da tensão no limite proporcional.....	72
3.8	ANÁLISE ESTATÍSTICA	73
4	<u>RESULTADOS E DISCUSSÃO</u>	75
4.1	ANÁLISE ENTRE A MADEIRA E COMPENSADOS.....	75
4.1.1	Variação da massa específica da madeira sólida e das lâminas no sentido medula-casca na árvore	75
4.1.2	Variação da massa específica aparente nos compensados	78
4.1.3	Variação das propriedades mecânicas no sentido medula-casca.....	81
4.1.4	Modelos para estimar as propriedades dos compensados	90
4.2	EQUIVALÊNCIA ENTRE AS PROPRIEDADES ELÁSTICAS E DE RESISTÊNCIA DOS COMPENSADOS DETERMINADAS ATRAVÉS DE ENSAIOS DE FLEXÃO ESTATICA CONVENCIONAIS E EQUAÇÕES TEÓRICAS	92
4.2.1	Relações e cálculo das propriedades mecânicas da madeira sólida e das lâminas.....	92

4.2.2	Determinação das propriedades de resistência à flexão estática convencional dos compensados.....	95
4.2.3	Cálculo do módulo de elasticidade teórico.....	98
4.2.4	Cálculo do módulo de ruptura teórico.....	102
4.2.5	Cálculo da tensão no limite proporcional teórica.....	106
4.3	RELAÇÕES E PROPRIEDADES DE RESISTÊNCIA E RIGIDEZ À FLEXÃO, DOS COMPENSADOS	107
5	<u>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</u>	116
	<u>ANEXOS</u>	120
	<u>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u>	161

LISTA DE FIGURAS

1	CONSTRUÇÃO DE COMPENSADOS BALANCEADOS. (a) ORIENTAÇÃO DE LÂMINAS; (b) PLANO DE SIMETRIA; (c) NÚMERO ÍMPAR DE LÂMINAS; (d) NÚMERO PAR DE LÂMINAS. (BODIG & JAYNE, 1982).....	9
2	EMPENAMENTO DO COMPENSADO DESBALANCEADO DEVIDO À VARIAÇÃO DE UMIDADE. (BODIG & JAYNE, 1982)	9
3	EQUILÍBRIO DE UM PAINEL COMPENSADO. (SUCHSLAND, 1972).....	10
4	VARIAÇÃO DOS PARÂMETROS ELÁSTICOS NUM COMPENSADO (a) LÂMINAS SIMPLES; (b) LÂMINAS CRUZADAS A 90º; (c) LÂMINAS ADJACENTES NUM ÂNGULO DE 30º (BODIG & JAYNE, 1982).....	11
5	(a) COMPONENTES DE TENSÃO EM UM CUBO ELEMENTAR EM UM SISTEMA DEXTRÓGIRO ORTOGONAL; (b) REPRESENTAÇÃO ORTOTRÓPICA DA MADEIRA. (CARRASCO, 1989).....	18
6	PLANOS DE SIMETRIA ELÁSTICA E DIREÇÕES PRINCIPAIS NUM COMPENSADO	24
7	COMPORTAMENTO ELÁSTICO LINEAR. a) VARIAÇÃO DOS ESFORÇOS E DEFORMAÇÕES NA SEÇÃO TRANSVERSAL DE UMA LÂMINA; b) VARIAÇÃO DOS ESFORÇOS E DEFORMAÇÕES NA SEÇÃO TRANSVERSAL DE MULTICAMADAS. (BOOTH, 1990).....	30

8	DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE À FLEXÃO NUM PAINEL COMPENSADO. a) FLEXÃO COM A GRÃ DA LÂMINA DA CAPA PARALELA AO VÃO; b) FLEXÃO COM A GRÃ DA LÂMINA DA CAPA PERPENDICULAR AO VÃO. (GURFINKEL, 1973)	31
9	a) SEÇÃO TRANSVERSAL REAL DE UM COMPENSADO; b) SEÇÃO TRANSVERSAL HOMOGENEIZADA.....	33
10	ESQUEMA DA RETIRADA DO MATERIAL PARA O ESTUDO	54
11	ESQUEMA DA RETIRADA DOS CORPOS DE PROVA PARA O ESTUDO	56
12	ESQUEMA DA CORRESPONDÊNCIA DO MATERIAL PARA O ESTUDO DAS PROPRIEDADES DA MADEIRA E AS LÂMINAS PARA CONFEÇÃO DOS COMPENSADOS	60
13	ESQUEMA DA FORMA DE RETIRADA DOS CORPOS DE PROVA DOS COMPENSADOS.....	64
14	ENSAIOS DE FLEXÃO ESTÁTICA	65
15	REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DAS EQUAÇÕES DE REGRESSÃO SIMPLES, AJUSTADAS PARA O MÓDULO DE ELASTICIDADE, MÓDULO DE RUPTURA, TENSÃO NO LIMITE PROPORCIONAL E MASSA ESPECÍFICA PARA <i>Pinus taeda</i> (A) E <i>Pinus elliottii</i> (B).....	84
16	REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DAS EQUAÇÕES DE REGRESSÃO, AJUSTADAS PARA A MASSA ESPECÍFICA DOS COMPENSADOS E A MASSA ESPECÍFICA DAS LÂMINAS PARA <i>Pinus taeda</i> (A) E <i>Pinus elliottii</i> (B)	91

17	REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DAS EQUAÇÕES DE REGRESSÃO SIMPLES, AJUSTADAS PARA O MÓDULO DE ELASTICIDADE, MÓDULO DE RUPTURA E A MASSA ESPECÍFICA PARA COMPENSADOS DE <i>Pinus taeda</i>	111
18	REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DAS EQUAÇÕES DE REGRESSÃO SIMPLES, AJUSTADAS PARA A TENSÃO NO LIMITE PROPORCIONAL E A MASSA ESPECÍFICA, MÓDULO DE RUPTURA E MÓDULO DE ELASTICIDADE PARA COMPENSADOS DE <i>Pinus taeda</i>	112
19	REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DAS EQUAÇÕES DE REGRESSÃO SIMPLES, AJUSTADAS PARA A TENSÃO NO LIMITE PROPORCIONAL E O MÓDULO DE ELASTICIDADE, O MÓDULO DE RUPTURA E A TENSÃO NO LIMITE PROPORCIONAL PARA COMPENSADOS DE <i>Pinus taeda</i>	113
20	REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DA VARIAÇÃO DE FREQUÊNCIAS DA MASSA ESPECÍFICA, MÓDULO DE ELASTICIDADE E MÓDULO DE RUPTURA PARA COMPENSADOS DE <i>Pinus taeda</i> (A) E <i>Pinus elliottii</i> (B)	115
21	DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE E A RESISTÊNCIA EM UM PAINEL COMPENSADO SUBMETIDO À COMPRESSÃO OU TRAÇÃO AXIAL	122
22	REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DAS EQUAÇÕES DE REGRESSÃO SIMPLES, AJUSTADAS PARA O MÓDULO DE ELASTICIDADE, MÓDULO DE RUPTURA E A MASSA ESPECÍFICA PARA COMPENSADOS DE <i>Pinus elliottii</i>	158
23	REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DAS EQUAÇÕES DE REGRESSÃO SIMPLES, AJUSTADAS PARA A TENSÃO NO LIMITE PROPORCIONAL E A MASSA ESPECÍFICA, E MÓDULO DE RUPTURA E MÓDULO DE ELASTICIDADE PARA COMPENSADOS DE <i>Pinus elliottii</i>	159

24	REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DAS EQUAÇÕES DE REGRESSÃO SIMPLES, AJUSTADAS PARA A TENSÃO NO LIMITE PROPORCIONAL E O MÓDULO DE ELASTICIDADE, O MÓDULO DE RUPTURA E A TENSÃO NO LIMITE PROPORCIONAL PARA COMPENSADOS DE <i>Pinus elliottii</i>	160
----	--	-----

LISTA DE TABELAS

1	MÉDIA DE DAP (cm) E ALTURA DO FUSTE (m) DAS ÁRVORES COLETADAS.....	53
2	PROPRIEDADES MECÂNICAS E FÍSICAS ESTUDADAS, E ESPECIFICAÇÕES DE NORMAS UTILIZADAS NOS TESTES	57
3	PROPRIEDADES MECÂNICAS E FÍSICAS ESTUDADAS, E ESPECIFICAÇÕES DAS NORMAS UTILIZADAS EM TESTES DE COMPENSADOS	63
4	VALORES MÉDIOS DAS PROPRIEDADES DE RESISTÊNCIA E MASSA ESPECÍFICA PARA A MADEIRA <i>Pinus taeda</i>	76
5	VALORES MÉDIOS DAS PROPRIEDADES DE RESISTÊNCIA E MASSA ESPECÍFICA PARA A MADEIRA <i>Pinus elliottii</i>	76
6	VALORES MÉDIOS DAS PROPRIEDADES DE FLEXÃO ESTÁTICA DE LÂMINAS DE MADEIRA DE <i>Pinus taeda</i> (A) E <i>Pinus elliottii</i> (B)	78
7	VALORES MÉDIOS DA MASSA ESPECÍFICA E DE FLEXÃO ESTÁTICA PARALELA (A) E PERPENDICULAR (B) ÀS FIBRAS DE COMPENSADOS DE <i>Pinus taeda</i>	79
8	VALORES MÉDIOS DA MASSA ESPECÍFICA E DE FLEXÃO ESTÁTICA PARALELA (A) E PERPENDICULAR (B) ÀS FIBRAS DE COMPENSADOS DE <i>Pinus elliottii</i>	80
9	VALORES MÉDIOS DE MASSA ESPECÍFICA DA MADEIRA SÓLIDA, LÂMINAS E COMPENSADOS DE <i>Pinus taeda</i> E <i>Pinus elliottii</i> , E VARIAÇÃO ENTRE AS POSIÇÕES EM PORCENTAGEM.....	81

10	RESUMO DAS SIGNIFICÂNCIAS ESTATÍSTICAS DO TESTE DE TUKEY EFETUADO PARA AS MÉDIAS DAS TRÊS POSIÇÕES A, B e C	82
11	EQUAÇÕES DE REGRESSÃO LINEAR DO MÓDULO DE ELASTICIDADE (MOE), MÓDULO DE RUPTURA (MOR) E A TENSÃO NO LIMITE PROPORCIONAL (TLP) EM FUNÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA PARA MADEIRA SÓLIDA, COMPENSADOS E LÂMINAS DE <i>Pinus taeda</i> e <i>Pinus elliottii</i>	85
12	COMPARAÇÃO DOS VALORES DE RESISTÊNCIA À FLEXÃO ESTATICA OBTIDOS NESTA PESQUISA, COM ALGUNS VALORES ENCONTRADOS NA LITERATURA.....	89
13	RESULTADOS DAS ANÁLISES DE REGRESSÃO ENTRE AS PROPRIEDADES DOS COMPENSADOS E DAS LÂMINAS	91
14	VALORES DO MÓDULO DE ELASTICIDADE, MÓDULO DE RUPTURA E TENSÃO NO LIMITE PROPORCIONAL DA MADEIRA SÓLIDA E LÂMINAS DE <i>Pinus taeda</i> OBTIDOS NO TESTE DE FLEXÃO ESTATICA E COMPRESSÃO, E RELAÇÕES ENTRE O MÓDULO DE ELASTICIDADE LONGITUDINAL - E_L E TANGENCIAL - E_T (EM kgf/cm ²)	93
15	VALORES DOS MÓDULO DE ELASTICIDADE, MÓDULO DE RUPTURA E TENSÃO NO LIMITE PROPORCIONAL DA MADEIRA SÓLIDA E DAS LÂMINAS DE <i>Pinus elliottii</i> OBTIDOS NO TESTE DE FLEXÃO ESTATICA E COMPRESSÃO, E RELAÇÕES ENTRE O MÓDULO DE ELASTICIDADE LONGITUDINAL - E_L E TANGENCIAL - E_T (EM kgf/cm ²)	94

16	RESULTADOS MÉDIOS DE FLEXÃO ESTÁTICA PARALELA E PERPENDICULAR ÀS FIBRAS PARA AS VARIÁVEIS DE RESPOSTA, MÓDULO DE ELASTICIDADE, MÓDULO DE RUPTURA E TENSÃO NO LIMITE PROPORCIONAL DOS COMPENSADOS DE <i>Pinus taeda</i> (EM kgf/cm ²).....	96
17	RESULTADOS MÉDIOS DE FLEXÃO ESTÁTICA PARALELA E PERPENDICULAR ÀS FIBRAS PARA AS VARIÁVEIS DE RESPOSTA, MÓDULO DE ELASTICIDADE, MÓDULO DE RUPTURA E TENSÃO NO LIMITE PROPORCIONAL DOS COMPENSADOS DE <i>Pinus elliottii</i> (EM kgf/cm ²).....	97
18	RESULTADOS MÉDIOS DO MÓDULO DE ELASTICIDADE TEÓRICO (EM kgf/cm ²) DOS COMPENSADOS DE <i>Pinus taeda</i> E <i>Pinus elliottii</i> CONSIDERADA TODA A SEÇÃO TRANSVERSAL	99
19	RESULTADOS MÉDIOS DA RESISTÊNCIA À FLEXÃO ESTÁTICA TEÓRICA (EM kgf/cm ²) DOS COMPENSADOS DE <i>Pinus taeda</i> E <i>Pinus elliottii</i> CONSIDERADA SÓ AS LÂMINAS PARALELAS.....	101
20	RESULTADOS MÉDIOS DO MÓDULO DE RUPTURA TEÓRICO (EM kgf/cm ²) DOS COMPENSADOS DE <i>Pinus taeda</i> E <i>Pinus elliottii</i> CONSIDERADA TODA A SEÇÃO TRANSVERSAL.....	103
21	RESULTADOS MÉDIOS DA TENSÃO NO LIMITE PROPORCIONAL TEÓRICA (EM kgf/cm ²) DOS COMPENSADOS DE <i>Pinus taeda</i> E <i>Pinus elliottii</i> CONSIDERADA TODA A SEÇÃO TRANSVERSAL	106
22	EQUAÇÕES DE REGRESSÃO PARA AS PROPRIEDADES DE FLEXÃO ESTÁTICA DOS COMPENSADOS DE <i>Pinus taeda</i>	108
23	EQUAÇÕES DE REGRESSÃO PARA AS PROPRIEDADES DE FLEXÃO ESTÁTICA DOS COMPENSADOS DE <i>Pinus elliottii</i>	109

RESUMO

O presente trabalho teve por objetivo a determinação das propriedades elásticas e de resistência das chapas de madeira compensada confeccionadas com *Pinus taeda* L. e *Pinus elliottii* Engelm., provenientes de plantios com 30 anos de idade, localizados na Floresta Nacional de Irati Estado do Paraná. Foi estudada a variabilidade da massa específica e das propriedades mecânicas de flexão estática no sentido medula-casca no tronco da árvore, lâminas e compensados. Procurou-se determinar modelos para estimar as propriedades dos compensados e correlacionar o efeito das características da madeira nas propriedades. Foram realizados cálculos teóricos para estimar as propriedades de resistência e rigidez dos compensados a partir de propriedades de resistência da madeira e lâminas. Os resultados obtidos para as propriedades mecânicas e massa específica da madeira, lâminas e compensados mostraram diferenças significativas no sentido medula-casca no tronco, para ambas as espécies. A massa específica mostrou uma alta correlação com as propriedades mecânicas da madeira e lâminas e baixa correlação com as propriedades mecânicas dos compensados. A massa específica e as propriedades mecânicas da madeira não mostraram ser um estimador aceitável das propriedades mecânicas e massa específica dos compensados. Os resultados dos cálculos teóricos do módulo de ruptura (MOR) e o módulo de elasticidade (MOE) nas direções principais (x e y), dos compensados, tiveram uma forte equivalência aos valores observados através de ensaios convencionais. As propriedades de resistência mecânica de flexão estática e compressão paralela da madeira, em termos de módulo elasticidade longitudinal (E_L) e tangencial (E_T), utilizadas nas equações teóricas de predição, foram os de melhor desempenho. Os valores estimados para o MOE variaram de 8 a 16% no sentido paralelo e de 1 a 7% no sentido perpendicular, em relação aos valores observados, para o MOR de 1 a 6% para as duas direções principais, em ambas as espécies. As propriedades mecânicas dos compensados estimadas teoricamente, considerando atuantes somente as lâminas sob tensão paralelas ao vão, variaram de 1 a 10%, em relação aos cálculos, considerando toda a seção transversal.

ABSTRACT

The objective of this work was to determine the elastic constants and strength properties of plywood manufactured, from a 30 year-old *Pinus taeda* L. and *Pinus elliottii* Engelm., plantation from Iratí National Forest, Paraná State. The variability of specific gravity and mechanical properties in static bending from pith to bark of the bole, veneer and plywood was studied. Models to estimate the properties of plywood and to correlate the effect of wood characteristics in properties were created. Theoretical calculations were made in order to estimate plywood rigidity and strength properties with veneer and wood strength properties. Results obtained from mechanical properties and specific gravity in plywood, veneer and wood showed significant difference from pith to bark wood of the bole for both species. The specific gravity of wood presented a high correlation with veneer and wood mechanical properties, and low correlation with plywood mechanical properties. The specific gravity and wood mechanical properties did not prove to be an acceptable estimator of mechanical properties and plywood specific gravity. The results of theoretical calculations of modulus of rupture (MOR) and modulus of elasticity of plywood (MOE) in the two principal directions (x and y) had a strong equivalence with the values observed through conventional tests. The modulus of parallel elasticity in static bending (E_L) and perpendicular compression (E_T) of wood, to calculate the theoretical values, were the best to explain the values obtained in relation to the observed values. The estimate MOE in plywood varied from 8 to 16% on parallel direction and from 1 to 7% on perpendicular direction. The variation MOR was from 1 to 6%, in the two principal directions in both species. The theoretical estimate mechanical properties of plywood, considering only the parallel veneer of span, varied from 1 to 10% in relation to the value obtained using all transversal section.

1 INTRODUÇÃO

No começo da implantação da indústria de compensados no Brasil, houve uma adaptação da tecnologia importada existente, para trabalhar com espécies apropriadas para este tipo de processamento como araucárias, ímbuias e cedros e que acreditava-se que constituíam uma fonte de matéria-prima inesgotável, devido à disponibilidade e fartura.

Com o aumento do consumo e do distanciamento das reservas naturais das espécies consideradas tradicionais, dos grandes centros consumidores, o abastecimento de matéria-prima para as indústrias passou a ser prejudicado. Para contornar este problema, uma das opções foi a utilização de madeira de reflorestamentos e que hoje é praticado pela indústria de polpa e papel, chapas de fibras e aglomerados, que utilizam basicamente este tipo de madeira. Portanto, os programas de reflorestamentos serão e são os responsáveis, em grande parte, pela manutenção destas indústrias.

Espécies exóticas como *Eucalyptus* spp e *Pinus* spp são as preferidas nestes programas, pois apresentam um crescimento rápido, curta rotação e altas taxas de retorno.

Atualmente no Brasil, há aproximadamente sete milhões de hectares reflorestados, dos quais quase dois milhões e meio com o gênero *Pinus*, especialmente *Pinus elliottii* e *Pinus taeda*, na região sul a utilização dessa madeira é quase restrita à produção de pasta para fabricação de papel, chapas de partículas, madeira serrada e ultimamente, na produção de lâminas para compensados puros de *Pinus* ou como produto misturado, onde o *Pinus* é usado somente no miolo. Segundo estimativas da ABIMCI (Associação Brasileira de Indústria de Madeira Compensada e Industrializada) do volume de chapas produzidas no sul do Brasil, estimado em 700.000 m³/ano, mais de 50% é formado por lâminas de *Pinus*. O

emprego para tais usos, tem causado frustrações durante o processamento da madeira, devido, principalmente, ao aparecimento de inúmeros defeitos que conduzem a consideráveis perdas de matéria-prima, e consequentemente, econômicas, pois a preocupação até o presente foi a máxima produção de massa, sem dar a devida atenção ao ajustamento das espécies às utilizações ou seleção para finalidades pré-concebidas.

Um dos principais fatores que contribuiu para o desenvolvimento tecnológico na manufatura de painéis a base de madeira foi a mudança da matéria-prima utilizada, sobretudo a necessidade de empregar madeiras provenientes de espécies florestais alternativas e de qualidade considerada inferior.

Com o avanço das técnicas silviculturais e com a tendência contínua de aumentar as áreas plantadas com *Pinus*, como também, experiências obtidas na manufatura de lâminas e compensados em outros países, a utilização dessas madeiras constituem uma das melhores opções para o fornecimento de matéria-prima, quando bem manejadas.

Do ponto de vista tecnológico, a maioria dos produtos laminados de madeira refletem, de certa maneira, as propriedades das espécies das quais foram manufaturados. Estas relações entre propriedades da matéria-prima e produto final tem sido objetivo de consideráveis esforços de pesquisas no exterior.

O conhecimento das propriedades elásticas e de resistência da madeira compensada é indispensável para diversas soluções construtivas tais como: placas, cascas, almas de vigas em I, painéis de piso, móveis e divisórias, a fim de permitir uma avaliação da capacidade destas estruturas no estado limite último.

Atualmente, no Brasil, existem poucas pesquisas ou dados sobre a qualidade da madeira de espécies exóticas e sua influência nas propriedades de produtos laminados, sendo este um fator limitante ao uso do material em projetos de responsabilidade. Para os *Pinus*, em particular, as investigações já existentes

concentram-se, principalmente, no setor de papel e celulose e são de pouca aplicabilidade na indústria de compensados. Os levantamentos bibliográficos levaram a uma quantidade reduzida de trabalhos de pesquisa de interesse direto à indústria de madeira compensada. Entre estes trabalhos citam-se estudos sobre compensados de *Pinus* conduzidos por HAYASHIDA (1972) e (1973), JANKOWSKY (1978), ROMERO DE AGUIAR (1983), MEDINA (1986) e LARA PALMA (1986).

A falta de informação básica sobre a influência das propriedades da madeira em compensados de *Pinus spp.*, levou a estabelecer, neste estudo, os seguintes objetivos:

- Estabelecer relações entre as propriedades físicas e mecânicas da madeira, na forma de corpos de prova padronizados e de lâminas, com as propriedades físicas e mecânicas de compensados de *Pinus elliottii* e *Pinus taeda*.
- Determinar as propriedades elásticas e da resistência para compensados de 5 lâminas, para futuras análises estruturais.
- Desenvolver modelos matemáticos para a estimativa das propriedades dos compensados em função do módulo de elasticidade, módulo de ruptura e massa específica da madeira.
- Avaliar as correlações entre as propriedades estudadas dos compensados.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 PRODUTOS COMPOSTOS DE MADEIRA

Os compostos de madeira podem ser classificados em dois grupos: a) compostos laminados, que utilizam lâminas contínuas como os compensados e vigas laminadas e b) compostos de partículas, que utilizam obviamente partículas de madeira das mais diversas geometrias, usualmente numa matriz randômica, como chapas aglomeradas, chapas de fibra e inclusive papel (KEINERT, 1984).

Nos compostos de madeira, a madeira sólida é reduzida a elementos com características e tamanhos particulares àqueles produtos. Estes elementos são recombinaados para formarem produtos com formas e tamanhos desejáveis. As propriedades mecânicas e não mecânicas destes compostos são geralmente diferentes daqueles da matéria-prima original.

Estas modificações das propriedades originais da madeira sólida são devidas ao reordenamento dos elementos, resultando em descontinuidade da estrutura, direção de fibras ao acaso, introdução de ligações adesivas artificiais, densificação e outras variáveis. Algumas das características mais importantes das espécies perdem valor dependendo do grau de conversão dos elementos e do grau de casualidade. Outras características da espécie, no entanto, se evidenciam mesmo no produto composto (MARRA & YOUNGQUIST, 1981; MARRA, 1982).

Segundo JAYNE (1966) e BODIG & JAYNE (1982), existe pelo menos a possibilidade teórica de matematicamente prever as propriedades de um produto composto, partindo do conhecimento das propriedades da madeira sólida ou propriedades das fibras.

Muitas destas relações são complexas, outras já são conhecidas, mas um entendimento mais completo poderia auxiliar na seleção de espécies para a produção de produtos compostos para determinadas aplicações.

2.1.1 Compostos laminados de madeira

Os compostos laminados constituem uma grande quantidade de produtos a base de madeira, nos quais o controle das propriedades é conseguido através do desenho do composto.

Segundo BODIG & JAYNE (1982) e FREAS & SELBO (1954), os compostos laminados podem ser classificados das mais diferentes maneiras ou agrupamentos, incluindo-se laminados paralelos, laminados transversais, madeira reforçada e painéis em sanduíche.

A madeira laminada colada (Glulam) e a madeira folhada colada (LVL) são os melhores exemplos de laminação paralela. Nestas estruturas as lâminas de madeira são dispostas com as fibras paralelas ao eixo da peça e solidarizadas com um elemento de união (Ex: pregos, parafuso e adesivo) obtendo-se, desta maneira, uma peça com seção e comprimento ilimitados, funcionando como uma só unidade estrutural e com propriedades similares às da madeira maciça (CHUGG, 1964).

A madeira compensada é o composto de laminação transversal mais usado, no qual as lâminas adjacentes estão orientadas normalmente com a direção das fibras formando ângulo de 90°.

A madeira reforçada normalmente são vigas laminadas, nas quais são colocados tirantes de aço para incrementar a resistência à tração.

Os painéis em sanduíche são compostos por lâminas de face de alta resistência e rigidez e por um núcleo de baixa resistência e rigidez.

2.2 COMPENSADO

2.2.1 Histórico, definição e classificação

O termo "compensado" foi introduzido pela primeira vez na terminologia industrial durante a primeira guerra mundial. Até esta data, os produtos deste tipo eram chamados de folheados (DOUGLAS FIR PLYWOOD ASSOCIATION, 1960).

O progresso tecnológico da laminação surgiu mesmo com o desenvolvimento do torno desfolhador pela metade do século XIX. A primeira patente conhecida data de 1840 nos Estados Unidos da America e a 2ª, de 1844 na França. Mas, o compensado começou a ser fabricado comercialmente no início deste século, nos Estados Unidos, a partir da espécie Douglas fir (DOUGLAS FIR PLYWOOD ASSOCIATION, 1960; BALDWIN, 1981).

No Brasil, os compensados foram introduzidos por volta de 1928 e 1945 nos estados de São Paulo e Paraná. Atualmente grande número de indústrias atende à demanda nacional deste produto.

A designação do uso final do compensado é função da espécie, da qualidade das lâminas, do arranjo, e do tipo de adesivo usado na fabricação da chapa.

Segundo FOREST PRODUCTS LABORATORY (1987) os compensados podem classificar-se em dois grandes grupos: compensados industrial e construção e compensados decorativos de folhosas.

De uma forma geral, os compensados do primeiro grupo são usados quando características de resistência e rigidez são desejadas no produto final, e as do segundo grupo, quando a aparência é mais importante que a resistência.

Os adesivos utilizados na confecção destes dois grupos de compensados são diferentes e específicos para se obter um melhor desempenho quanto ao local

de utilização. Assim, os compensados são classificados também pela sua capacidade à exposição a umidade em dois tipos: exterior e interior. O primeiro é conhecido como "a prova de água", por ser o adesivo insolúvel em água, e o segundo é "resistente à umidade", sendo o adesivo resistente à umidade do ar, mas não a água.

As lâminas para a confecção de compensados são produzidas pela ação de corte através de facas específicas, em peças variando de 0,13 mm a 6,0 mm em espessura. O corte para obtenção de lâminas pode ser executado por faqueamento num sentido tangencial-radial, ou por corte rotatório num sentido tangencial fazendo a tora girar em torno do seu eixo contra um faca fixa.

Na prática, lâminas de madeira de folhosas obtidas por faqueamento são utilizadas geralmente para superfície de compensados decorativos. O compensado estrutural, entretanto, é produzido a partir de lâminas obtidas por corte rotatório.

2.2.2 Propriedades da laminação cruzada

Em contraste com a madeira laminada, no compensado as lâminas são alinhadas de acordo com uma disposição pré-determinada, de forma a se obter uma equivalência das propriedades elásticas e de resistência nas direções principais da chapa.

A construção de um painel compensado pela laminação cruzada e sua colagem capitalizam as mais desejáveis propriedades físicas e mecânicas da madeira (SUCHSLAND, 1972).

Segundo SUCHSLAND (1972); BODIG & JAYNE (1982) e KEINERT (1984), a construção em laminação cruzada, provendo grã longitudinal, tanto no sentido do

comprimento como da largura do compensado, também prove resistência à flexão e rigidez nos dois sentidos e uma equalização nas características de expansão do compensado causada pela higroscopicidade da madeira.

Para se obter estes resultados, teoricamente todo compensado deve apresentar simetria estrutural em relação ao plano central, como mostrado na Figura 1. Assim, as lâminas de cada lado do plano de simetria, equidistantes do centro, devem ter as mesmas propriedades físicas, mesma espessura e direção da grã. A existência do plano de simetria na camada do núcleo implica na existência de um número ímpar de camadas. Este tipo de compensado é denominado balanceado. (BODIG & JAYNE, 1982).

O exemplo mais simples de compensado balanceado é aquele composto por um número ímpar de camadas da mesma espécie e da mesma espessura. No entanto, o balanceamento pode ser conseguido utilizando-se lâminas de espécies diferentes. Para isto, as lâminas correspondentes de cada lado do plano de simetria devem ter propriedades físicas equivalentes. A montagem do compensado balanceado a partir de espécies com diferentes coeficientes de inchamento requer um controle preciso do processo de fabricação. Para manter o balanceamento, a espessura das lâminas deve ser ajustada para compensar o inchamento diferencial (SUCHSLAND, 1972). A Figura 1, mostra exemplos característicos de construções balanceadas em compensados feitos com um número ímpar de camadas ou um número par de camadas onde a simetria é mantida.

Se o balanceamento na fabricação do painel compensado não for perfeito, poderão ocorrer tensões internas com a variação da umidade, causando o empenamento na chapa, como indica a Figura 2.

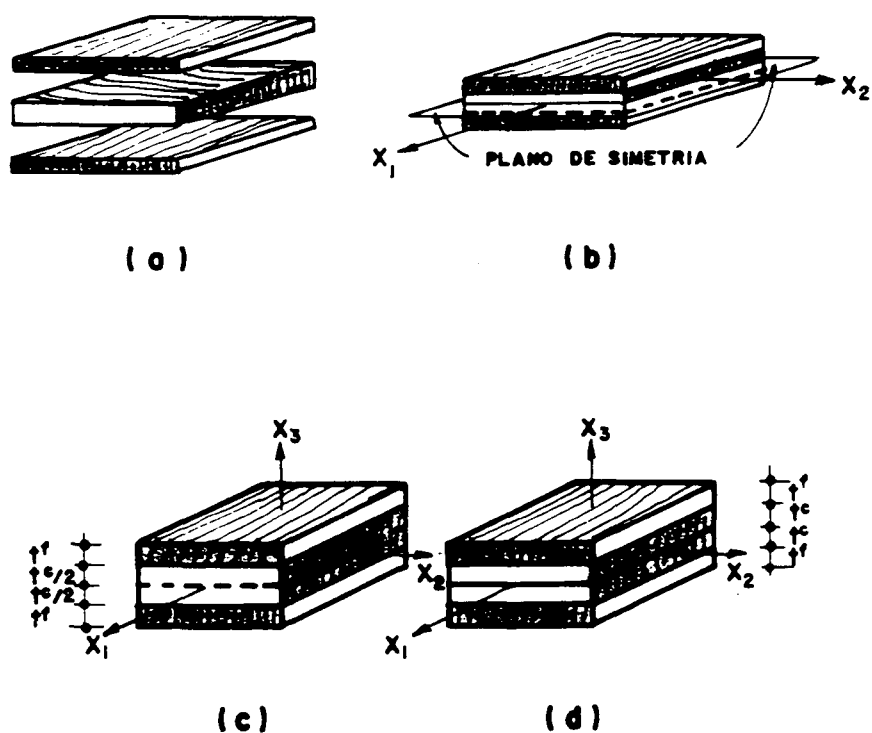


FIGURA 1- CONSTRUÇÃO DE COMPENSADOS BALANCEADOS. (a) ORIENTAÇÃO DE LÂMINAS; (b) PLANO DE SIMETRIA; (c) NÚMERO ÍMPAR DE LÂMINAS; (d) NÚMERO PAR DE LÂMINAS. (BODIG & JAYNE, 1982)

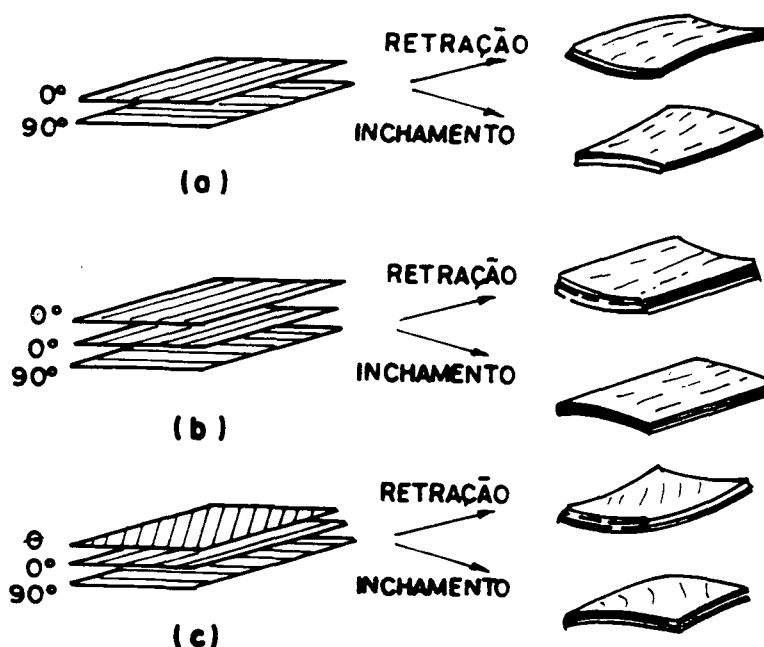


FIGURA 2- EMPENAMENTO DO COMPENSADO DESBALANCEADO DEVIDO À VARIAÇÃO DE UMIDADE. (BODIG E JAYNE, 1982).

Segundo SUCHSLAND (1972), uns dos resultados importantes da composição transversal das lâminas balanceada é que a expansão de um compensado devido a sua higroscopicidade, é quase igual àquela da madeira sólida ao longo da grã, como mostra a Figura 3. A expansão linear mínima da madeira sólida e a rigidez máxima em tração e compressão ocorreu na mesma direção em relação a grã (direção longitudinal). Este tipo de combinação causa a expansão longitudinal mínima de produtos de laminação cruzada como o compensado.

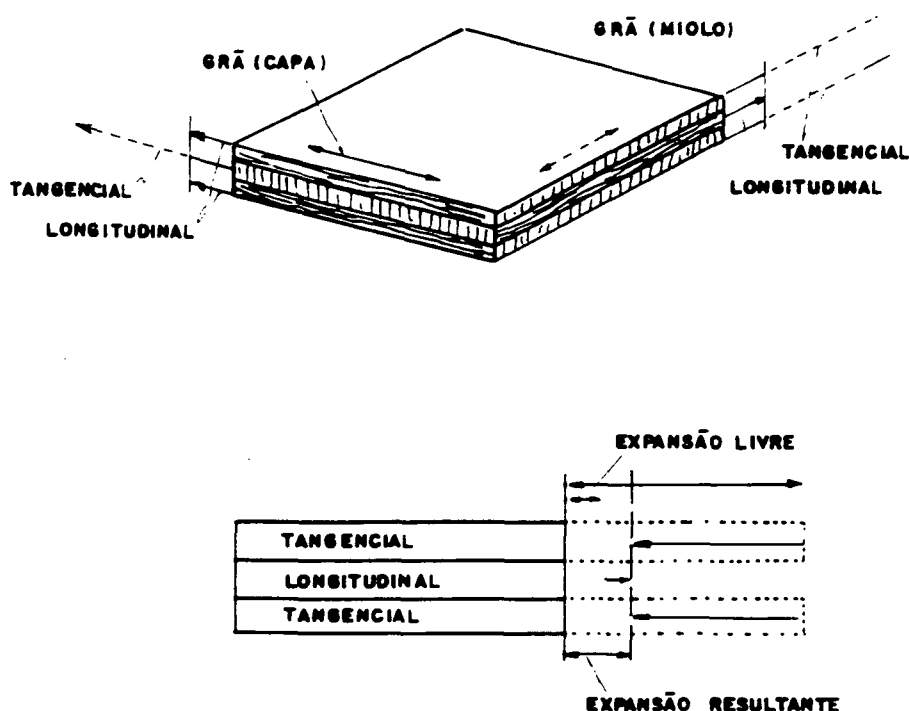


FIGURA 3- EQUILÍBRIO DE UM PAINEL COMPENSADO. (SUCHSLAND, 1972).

De acordo com BODIG & JAYNE (1982), a eficiência da laminação cruzada num compensado pode ser ilustrada pelos diagramas da Figura 4. Assim, a variação dos parâmetros elásticos de uma lâmina de madeira no plano longitudinal-tangencial (LT) pode ser representada em um gráfico de coordenadas polares conforme figura 4a.

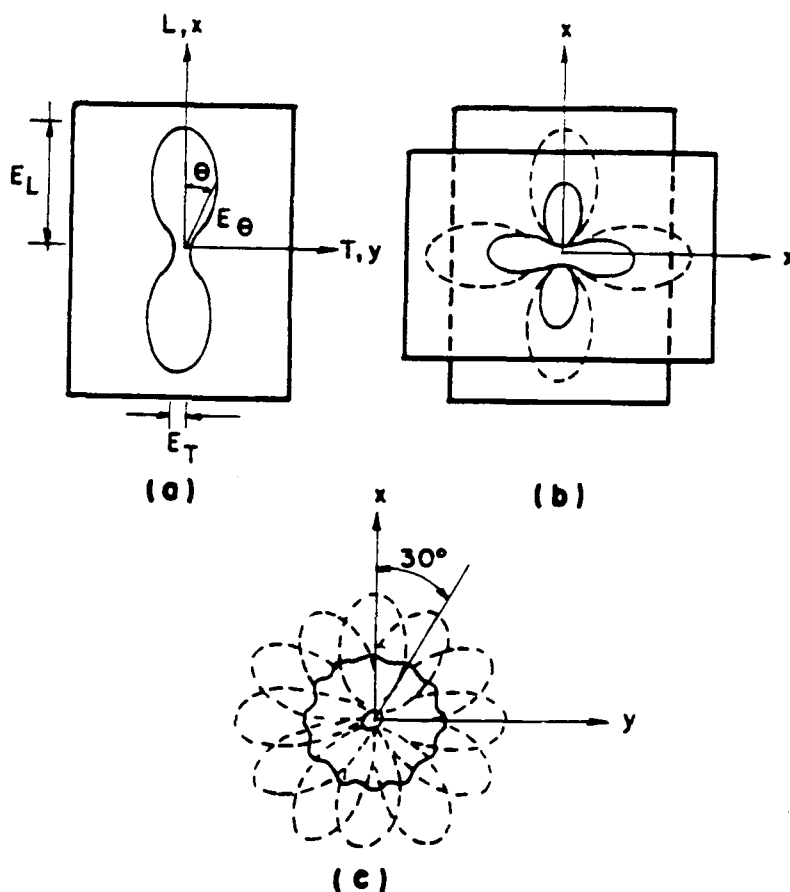


FIGURA 4- VARIAÇÃO DOS PARÂMETROS ELÁSTICOS NUM COMPENSADO (a) LÂMINAS SIMPLES; (b) LÂMINAS CRUZADAS A 90° ; (c) LÂMINAS ADJACENTES NUM ÂNGULO DE 30° (BODIG & JAYNE, 1982).

No caso de lâminas obtidas por corte rotatório, o plano da lâmina coincide com o plano LT. Se duas lâminas da mesma espessura são coladas, com seus eixos longitudinais (L) formando ângulo de 90° , suas propriedades direcionais são ponderadas conforme ilustrado pelo gráfico com linha cheia da figura 4b. O trevo no diagrama, mostra o módulo de elasticidade médio \bar{E} , da composição obtida. Os valores mínimos de \bar{E} ocorrem nas direções a 45° com os eixos x e y . Na figura 4c, é apresentado em linha cheia, o diagrama para uma composição de várias lâminas, na qual a direção do eixo longitudinal de cada lâmina é desalinhado em um ângulo

de 30°. Neste caso, consegue-se um valor de \bar{E} quase constante em qualquer direção do plano, aproximando-se assim de uma isotropia do material.

Na fabricação comercial do compensado, é normal orientar a direção das fibras das lâminas adjacentes em um ângulo de 90°. Assim, a resistência e rigidez no sentido do comprimento do compensado serão um pouco menores que aqueles de madeira sólida mas a resistência e rigidez nos outros sentidos da grã são significativamente aumentadas sobre a madeira sólida, sendo duas vezes maior em três camadas e quase seis vezes maior no de cinco camadas. Quanto maior o número de camadas maior será a equalização em termos de resistência nas duas direções e melhor a distribuição de carga através do painel (FREAS, 1964; SUCHSLAND, 1972; BODIG & JAYNE, 1982 e McNATT et al., 1990).

2.3 INFLUÊNCIA DA MADEIRA NAS PROPRIEDADES DE RIGIDEZ E RESISTÊNCIA DO COMPENSADO

2.3.1 Considerações gerais

Do ponto de vista da aplicação estrutural dos painéis, a determinação das propriedades elásticas e de resistência do compensado são investigadas profundamente no exterior. Para fazê-lo, diversas técnicas ou métodos experimentais são utilizados para examinar estas propriedades.

Segundo BOOTH (1990), os trabalhos feitos neste sentido têm basicamente dois objetivos: o primeiro é a determinação das propriedades elásticas experimentalmente por diversos métodos de ensaio, e o segundo é a formulação de equações para predição e avaliação destes parâmetros, a partir das propriedades correspondentes das lâminas individuais.

Assim, a teoria elástica válida no comportamento elástico de um material homogêneo e isotrópico, continua sendo utilizada para a determinação dos parâmetros na madeira sólida e compostos de madeira.

A análise experimental de tensões e deformações é uma ferramenta sem dúvida, das mais esclarecedoras do comportamento do material a solicitações externas, pelo tanto, faz-se necessário entender algumas características da estrutura da matéria-prima madeira e o modelo tensorial utilizado para explicar o comportamento.

2.3.2 Estrutura da madeira

2.3.2.1 Anisotropia da madeira

A madeira é um produto orgânico sendo usada, principalmente, em seu estado natural, constituindo-se de camadas concêntricas de crescimento. Esta é produzida por árvores que crescem sobre condições ecológicas variáveis, que naturalmente, afetam suas taxas de crescimento, forma, estrutura e resistência, variações estas que tornam difícil atribuir valores de esforços de trabalho com o mesmo grau de precisão que outros materiais, tais como o aço e concreto.

As propriedades anisotrópicas originam-se de sua estrutura celular. A maioria das células são longas, de forma tubular e com excessão dos segmentos vasculares em folhosas, têm suas extremidades abertas. Dependendo da espécie, 70 a 95% das células têm seu eixo paralelo ao comprimento da tora e a porcentagem restante das células são orientadas do centro para fora do tronco em camadas que originam os raios.

As diferenças no arranjo dos tecidos, dimensões e espessura da parede celular determinam valores próprios da massa específica para cada espécie de madeira. Salienta-se que a resistência da madeira está estreitamente relacionada com a sua massa específica (PARKER, 1979).

O conhecimento da massa específica é importante pois permite tirar conclusões sobre a adaptabilidade da madeira como material de construção para fins estruturais, devido à boa relação de resistência/massa que apresenta.

Segundo TRENDLENBURG & MAYER-WEGELIN (1956), a grande variabilidade da madeira pode ser expressa pelas variações da massa específica.

KOLLMANN & COTÉ JUNIOR (1968) e CAMARGO (1987), afirmam que, como regra geral, a grande variabilidade na massa específica das coníferas depende mais da variabilidade da porcentagem de lenho tardio do que da variabilidade das massas específicas individuais dos lenhos inicial e tardio.

Das informações disponíveis na literatura, conclui-se que, para as espécies do gênero *Pinus*, o modelo de variação mais comum (quer para a massa específica, que para a quantidade de lenho tardio) é decrescente com a altura (HEGER, 1974; PEARSON & GILMORE, 1980) e crescente com a idade no sentido da medula para a casca (SELLERS, 1962; LEMA et al., 1978; KALINKOV & GEORGIEV, 1979).

De acordo com vários autores, a massa específica apresenta grande variação entre as espécies, dentro de uma mesma espécie e mesmo dentro de uma única árvore, podendo ser explicada pela proporção de parede celular, posição no tronco, porcentagem de lenho tardio e largura dos anéis de crescimento, entre outros fatores. Para TRENDLENBURG & MAYER-WEGELIN (1956) a massa específica de uma espécie varia, geralmente, em torno de 30% em relação a sua média.

Segundo KOLLMANN (1951), no caso específico de *Pinus*, as variações da massa específica podem ser tão acentuadas no sentido longitudinal da árvore a

ponto de sugerir diferentes classes de qualidade apenas em função da posição de origem da peça.

Na maioria das coníferas a largura dos anéis de crescimento pode ser indicadora de muitas características e do comportamento da madeira, tais como a regularidade e distribuição de determinadas propriedades, manutenção da forma depois de trabalhada, massa específica e propriedades mecânicas (KNIGGE & SCHULZ, 1966).

A proporção de lenho tardio é de grande interesse para as propriedades mecânicas da madeira especialmente em se tratando de espécies com acentuada diferença de massa específica e estrutura entre as zonas de lenho inicial e tardio. Existe uma estreita relação entre a massa específica e a percentagem de lenho tardio, sendo de se esperar que, quanto maior for a percentagem deste, tanto maior será a resistência da madeira, o que é facilmente verificável em coníferas.

2.3.2.2 Planos de referência da madeira

Devido ao fato dos elementos constituintes do lenho se encontrarem orientados e organizados diferentemente, três direções e planos de referência mutuamente perpendiculares são utilizados para analisar o comportamento físico-mecânico da madeira.

Assim, a direção da grã (L) é a direção da maioria das células, a qual é paralela ao comprimento da tora; a direção radial (R) que acompanha o sentido dos raios, ou perpendicular aos anéis de crescimento, e a direção tangencial (T) perpendicular aos raios ou tangente aos anéis de crescimento. Planos de referência na madeira são definidos pelas direções: o plano (RT) é a superfície transversal da tora onde a maioria das células são vistas em corte transversal; o plano (RL) ou

superfície radial é definido pelo raio da tora e a direção da grã e o plano (TL) ou superfície tangencial é definido por uma tangente a seção da tora e a direção da grã.

2.3.3 Ortotropia na madeira

2.3.3.1 Considerações gerais

De acordo com McLAIN & BODIG (1974), NOACK & ROTH (1976), BODIG & JAYNE (1982) e BOOTH (1990) os materiais fibrosos de origem natural podem ser classificados, de um modo geral, como ortotrópicos. A ortotropia, quando usada na descrição de sólidos, se refere à estrutura interna do material, caracterizado por três planos de simetria, perpendiculares entre si. Na madeira, a simetria existe já a nível macroscópico, como consequência do arranjo dos elementos anatômicos.

A caracterização mecânica ou a caracterização da elasticidade dos materiais ortotrópicos pode ser feita por intermédio de tensões, ou seja, matrizes-tensor. Este recurso emprega o cálculo matricial e tensorial para a descrição de um sistema físico, simplificando-a, no caso de materiais ortotrópicos, em razão de sua simetria interna (ROCCO LAHR, 1983).

Um material ortotrópico é caracterizado por propriedades direcionais, portanto, a descrição se completa com a adoção de um sistema de referência. O mais simples é o de coordenadas retangulares, com os eixos coincidindo com as intersecções dos planos de simetria da madeira. Na madeira, os eixos coincidem com as direções longitudinal, tangencial e radial. (Figura 4).

A madeira, é considerada também, um material homogêneo e contínuo para análise de suas propriedades elásticas. A homogeneidade, refere-se à independência das propriedades físicas do meio, com respeito à posição ou ponto considerado.

Assim, por exemplo, a variação das propriedades físicas entre o lenho inicial e o lenho tardio é ignorada. A continuidade implica ignorar a presença do lúmen celular e espaços intercelulares na estrutura (JAYNE, 1966).

2.3.3.2 Tensões e deformações

As tensões em um meio contínuo são medidas como força por unidade de área e são apresentados por σ_{ij} , i e j podendo no caso, assumir os valores 1,2 e 3, como indicado na Figura 5.

Estas tensões são obtidas pela associação de um vetor de forças internas a cada uma das três direções do sistema de eixos adotado. Considerando a simetria das tensões no cubo elementar, tem-se que $\sigma_{ij} = \sigma_{ji}$ logo, conclui-se haver seis tensões independentes. A notação para o tensor das tensões é σ_{ij} , sendo escrita, em forma de matriz, como segue:

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix} \quad (1)$$

A matriz é simétrica em relação à sua diagonal principal. Adota-se a notação, na qual o primeiro índice refere-se a direção normal à face onde atua a tensão e o segundo a própria direção da tensão. Por conseguinte, se $i = j$, os esforços são normais e se $i \neq j$, os esforços são cisalhantes.

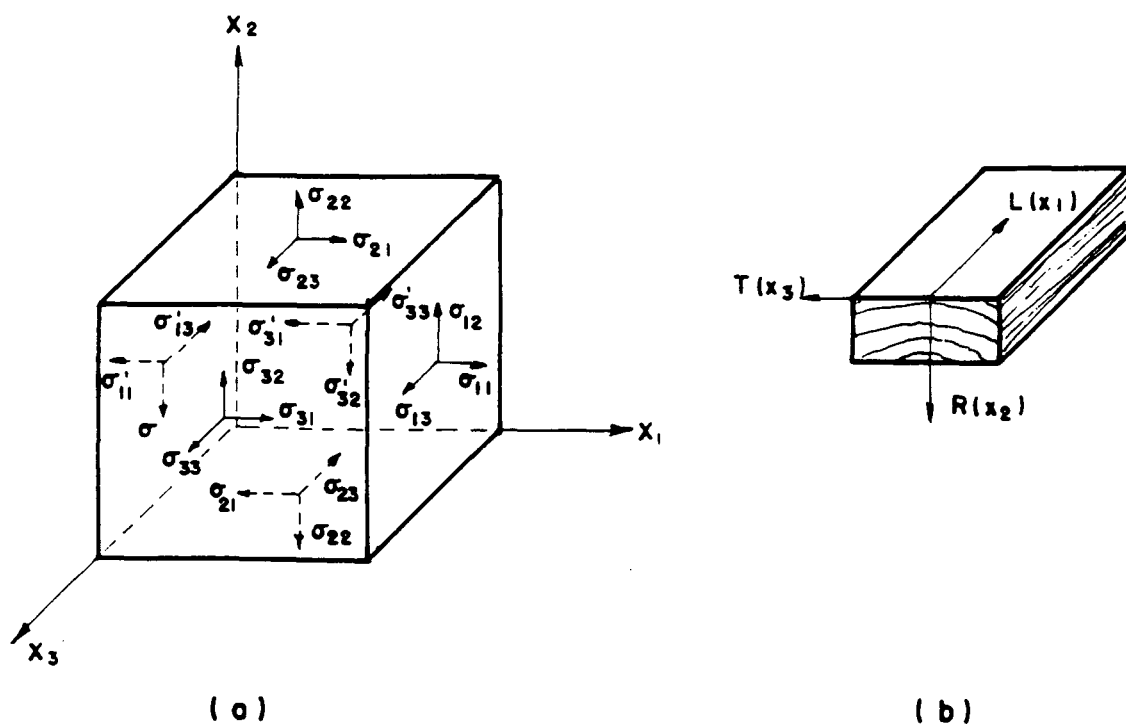


FIGURA 5- (a) COMPONENTES DE TENSÃO EM UM CUBO ELEMENTAR EM UM SISTEMA DEXTRÓGIRO ORTOGONAL; (b) REPRESENTAÇÃO ORTOTRÓPICA DA MADEIRA. (CARRASCO, 1989).

Por um outro lado, as deformações que estão associadas ao deslocamento de um ponto interno em um meio contínuo, originam também um tensor de deformações específicas (ϵ_{ij}), sendo escrito em forma de matriz, como segue:

$$\epsilon_{ij} = \begin{bmatrix} \epsilon_{11} & \epsilon_{12} & \epsilon_{13} \\ \epsilon_{21} & \epsilon_{22} & \epsilon_{23} \\ \epsilon_{31} & \epsilon_{32} & \epsilon_{33} \end{bmatrix} \quad (2)$$

A matriz ϵ_{ij} é simétrica em relação à diagonal principal e há seis componentes independentes.

Em alguns casos, é conveniente o uso dos elementos γ_{ij} (deformações de cisalhamento, definidos como:

$$\gamma_{ij} = \begin{bmatrix} \gamma_{11} & \gamma_{12} & \gamma_{13} \\ \gamma_{21} & \gamma_{22} & \gamma_{23} \\ \gamma_{31} & \gamma_{32} & \gamma_{33} \end{bmatrix} \quad (3)$$

2.3.3.3 Lei de Hooke

Segundo a Lei de Hooke, as deformações são proporcionais às tensões. Esta proporcionalidade define o comportamento elástico linear dos materiais. Em condições limites, tensões e deformações extremamente pequenas é aplicável a quase todos os materiais. Mas, acrescidos os valores das deformações, muitos materiais deixam de seguir a lei de Hooke. As diferenças devem ou não ser consideradas em função da aplicação prática desejada. Em casos comuns, os materiais para usos em estruturas, por hipótese, seguem a lei de Hooke (ROCCO LAHR, 1983).

A lei de Hooke na forma tensorial, pode ser escrita segundo BODIG & JAYNE (1982), do seguinte modo:

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \cdot \epsilon_{kl} \text{ , ou}$$

$$\epsilon_{ij} = S_{ijkl} \cdot \sigma_{kl}$$

A matriz C_{ijkl} é chamada de tensor de rigidez e sua inversa é a matriz S_{ijkl} , que em forma matricial corresponde a: $\sigma = C \cdot \epsilon$ e $\epsilon = S \cdot \sigma$.

2.3.3.4 Lei de Hooke para materiais ortotrópicos

A relação tensão-deformação expressa pela lei de Hooke, está baseada em um comportamento elástico linear do material. Para aplicação desta lei na madeira ou compostos a base de madeira, as deformações são consideradas pequenas, o

material homogêneo de densidade constante e uniforme e não a interferência entre os componentes de tensões.

A forma tensorial da lei de Hooke tem nove componentes de tensão σ_{ij} e nove componentes de deformação ε_{kl} . Consequentemente, o tensor de rigidez tem 81 constantes elásticas independentes, fazendo parte de nove equações, sendo três em relação às tensões normais e seis em relação às tensões de cisalhamento.

Considerando a simetria das tensões σ_{ij} e ε_{kl} , as componentes de cisalhamento passam de seis para três, restando portanto, no tensor de rigidez 36 constantes.

Admitindo-se três planos de simetria (material ortotrópico trí-ortogonal), anulam-se os coeficientes de influência mútua (influência da tensão de cisalhamento na tensão normal e vice-versa), restando apenas doze constantes elásticas, para descrever o comportamento elástico trí-dimensional de um meio contínuo como é considerada a madeira.

A lei de Hooke para materiais ortotrópicos na forma matricial considerando $x=x_1$, $y=y_2$ e $z=x_3$ segundo BODIG & JAYNE (1982), é apresentada como segue:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E_x & -\frac{\nu_{yx}}{E_y} & -\frac{\nu_{zx}}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{xy}}{E_x} & 1/E_y & -\frac{\nu_{zy}}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{xz}}{E_x} & -\frac{\nu_{yz}}{E_y} & 1/E_z & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{yz}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{xz}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{xy}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Apesar que doze constantes elásticas podem ser definidas para a madeira, todas elas podem ser determinadas a partir de que se conheçam nove, pois, existem somente 9 constantes independentes. Assim, existe um módulo de elasticidade para cada um dos três eixos x, y, z (E_x , E_y e E_z). Para cada plano existem duas razões de Poisson (ν_{yx} , ν_{zx} ; ν_{xy} , ν_{zy} e ν_{xz} , ν_{yz}) e um módulo de cisalhamento ou módulo de elasticidade transversal (G_{yz} , G_{xz} e G_{xy}) para cada um dos três eixos.

A assunção de ortotropia combinada com a simetria da matriz de coeficientes elásticos conduz às seguintes identidades:

$$-\frac{\nu_{yx}}{E_y} = -\frac{\nu_{xy}}{E_x}; \quad -\frac{\nu_{zx}}{E_z} = -\frac{\nu_{xz}}{E_x} \quad \text{e} \quad -\frac{\nu_{zy}}{E_z} = -\frac{\nu_{yz}}{E_z} \quad (5)$$

Para o caso específico da madeira, os eixos 1, 2 e 3 podem ser considerados coincidentes com as direções longitudinal (L) radial (R) e tangencial (T), ou seja, $x=x_1=L$, $y=x_2=R$ e $Z=x_3=T$, conduzindo a equação (4) a seguinte notação:

$$\begin{bmatrix} \epsilon_L \\ \epsilon_R \\ \epsilon_T \\ \gamma_{RT} \\ \gamma_{LT} \\ \gamma_{LR} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E_L & -\frac{\nu_{RL}}{E_R} & -\frac{\nu_{TL}}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{LR}}{E_L} & 1/E_R & -\frac{\nu_{TR}}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{LT}}{E_L} & -\frac{\nu_{RT}}{E_R} & 1/E_T & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{RT}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{LT}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{LR}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_L \\ \sigma_R \\ \sigma_T \\ \sigma_{RT} \\ \sigma_{LT} \\ \sigma_{LR} \end{bmatrix} \quad (6)$$

Segundo GOODMAN & BODIG (1970), apesar de pequenos desvios no cálculo experimental dos coeficientes elásticos da equação (6), a consideração de simetria é razoável e as equações (5) de identidade são válidas. Assim, os autores concluem que os coeficientes de Poisson ν_{RL} e ν_{TL} são muito pequenos na madeira o que implica em pequenos erros nas duas primeiras identidades das equações (5), simplificando ainda mais a lei de Hooke aplicada à madeira.

Uma outra conclusão do trabalho destes pesquisadores, foi que, apesar da variação dos módulos de elasticidade entre as diferentes madeiras, devido à espécie, conteúdo de umidade, temperatura, taxa de carregamento, etc., os módulos estão relacionados nas seguintes proporções:

$$E_L : E_R : E_T \approx 20 : 1.6 : 1$$

$$G_{LR} : G_{LT} : G_{RT} \approx 10 : 9.4 : 1$$

$$E_L : G_{RT} \approx 14 : 1$$

Deve-se prever que estas relações não são constantes e variam com E_L . Mas, algumas destas variações são evidentes, como por exemplo, $E_L : E_T \approx 24 : 1$ ser a maior relação encontrada em materiais ortotrópicos a base de madeira.

2.4 PARÂMETROS ELÁSTICOS E DE RESISTÊNCIA DO COMPENSADO

2.4.1 Considerações gerais

A análise dos parâmetros elásticos em compensados leva em consideração algumas hipóteses simplificadoras. A camada de adesivo entre as lâminas é considerada rígida e, além disto, o seu efeito nas propriedades elásticas das chapas

é desprezível. A consideração da contribuição da linha de cola no comportamento elástico complicaria demasiadamente a análise. A espessura irregular da camada de adesivo, a sua qualidade, as complicadas inter-relações que afetam a performance da linha de cola, a forma pela qual um adesivo adere à superfície de um sólido e as forças envolvidas no processo, introduzem complicações que, quando se tratar de uma análise mais simples, devem ser ignoradas.

O volume de adesivo utilizado no compensado é quase sempre inferior a 1% do volume total, assim, para finalidades práticas, a sua contribuição nas propriedades macroscópicas é mínima. No entanto, deve ser enfatizada a importância da qualidade do adesivo nas propriedades de resistência e de elasticidade do painel (BODIG & JAYNE, 1982).

Segundo MARCH (1944), a análise das propriedades elásticas do compensado baseia-se no conhecimento das constantes elásticas de cada lâmina isolada. As lâminas são consideradas homogêneas, isto é, a variação dos parâmetros elásticos do lenho tardio e lenho inicial através da espessura da lâmina é considerada constante, e valores médios destas constantes são utilizados.

De acordo com MARCH (1944); BODIG & GOODMAN (1973); McLAIN & BODIG (1974); BODIG & JAYNE (1982) e BOOTH (1990), para efeito de análise, o compensado pode ser considerado como um material ortotrópico, ou seja, com simetria elástica em relação a três planos mutuamente perpendiculares e caracterizado por propriedades direcionais. As direções principais de elasticidade, (x, y) no caso mais comum de compensado balanceado com lâminas adjacentes, formando ângulos de 90° entre si, podem ser identificados de acordo com a Figura 6. A direção x é paralela à direção das fibras da lâmina da face, a direção y é perpendicular à direção das fibras da lâmina da face e a direção z, perpendicular ao plano xy (plano do painel).

2.4.2 Ortotropia em compensados

A utilização do compensado em soluções estruturais práticas implica frequentemente na utilização da lei de Hooke no estado plano de tensões, ou seja, a aproximação bi-dimensional da teoria de elasticidade ortotrópica referida a uns dos planos principais do sistema coordenado.

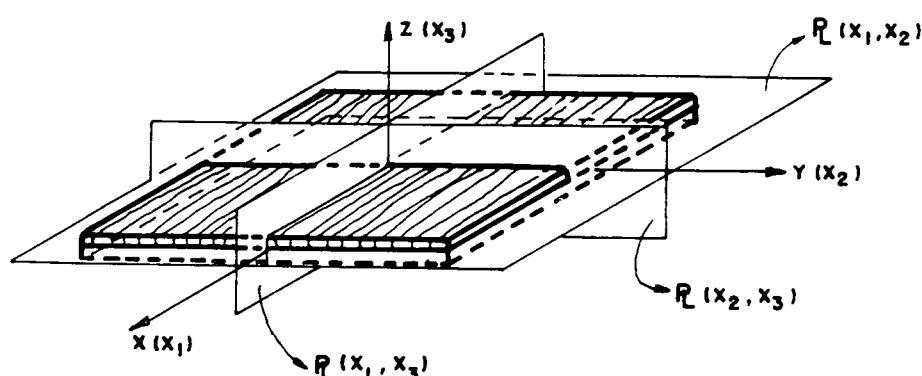


FIGURA 6- PLANOS DE SIMETRIA ELÁSTICA E DIREÇÕES PRINCIPAIS NUM COMPENSADO.

Assim, somente três componentes de tensões existem para a análise: dois normais σ_x e σ_y e um de cisalhamento τ_{xy} de acordo com a Figura 5. As tensões de cisalhamento τ_{xz} e τ_{yz} e a tensão normal σ_z estão presentes no sistema plano considerado, mas podem ser desprezadas sem erro por serem muito pequenas em relação aos outros e a componente de deformação ϵ_z é pouco importante tendo em vista sua pequena influência na flexão, refletindo portanto, apenas a variação de espessura do painel (JAYNE & SUDDARTH, 1966).

Admitindo-se então, um estado plano de tensões (x,y) com as considerações acima, a equação (6) para materiais ortotrópicos pode ser expressa como:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E_x & -\frac{\nu_{yx}}{E_y} & 0 \\ -\frac{\nu_{xy}}{E_x} & 1/E_y & 0 \\ 0 & 0 & 1/G_{xy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} \quad (7)$$

Considerando a simetria da matriz, tem-se:

$$-\frac{\nu_{yx}}{E_y} = -\frac{\nu_{xy}}{E_x} \quad (8)$$

Fica pois evidenciada, a importância do conhecimento dos parâmetros elásticos do compensado E_x , E_y , G_{xy} , ν_{xy} e ν_{yx} para a solução dos problemas nos quais é utilizado (McLAIN & BODIG, 1974).

2.4.3 Determinação das propriedades de elasticidade e resistência em compensados

MARCH (1944), apresentou os fundamentos do tratamento matemático dos materiais ortotrópicos e sua extensão à madeira e ao compensado, com o objetivo de equacionar o comportamento dos parâmetros elásticos.

Assim, o módulo de elasticidade efetivo para uma placa de compensado balanceado, submetido à ação de forças no seu plano, pode ser expresso por:

$$\bar{E}_x = \frac{1}{h} \left[\frac{\sum_{i=1}^n \frac{(E_x)_i h_i}{\lambda_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{(E_y)_i h_i}{\lambda_i}} - \frac{\sum_{i=1}^n \frac{(E_x)_i (v_{yx})_i h_i}{\lambda_i} \sum_{i=1}^n \frac{(E_y)_i (v_{xy})_i h_i}{\lambda_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{(E_y)_i h_i}{\lambda_i}} \right] \quad (9)$$

\bar{E}_x = módulo de elasticidade efetivo na direção x

$(E_x)_i$ = módulo de elasticidade da i-ésima lâmina na direção x

$(E_y)_i$ = módulo de elasticidade da i-ésima lâmina na direção y

h = espessura total do compensado

h_i = espessura da i-ésima lâmina

λ_i = $1 - (v_{xy})_i \cdot (v_{yx})_i$, aproximadamente igual a 1

$(v_{xy})_i$ = coeficiente de Poisson da i-ésima lâmina, descreve a relação entre a deformação na direção y e a deformação x, para um esforço axial na direção x

$(v_{yx})_i$ = coeficiente de Poisson da i-ésima lâmina, descreve a relação entre a deformação na direção x e a deformação y, para um esforço axial na direção y.

O eixo x é paralelo à direção das fibras da lâmina da face e o eixo y é perpendicular.

A expressão acima pode ser simplificada desprezando-se o termo seguinte ao sinal menos, sem causar com isso erro significativo. Substituindo-se λ_i por um, tem-se:

$$\bar{E}_x = \frac{1}{h} \left[\sum_{i=1}^n (E_x)_i \cdot h_i \right] \quad (10)$$

O valor do módulo de elasticidade efetivo, \bar{E}_y na direção y pode ser obtido de maneira análoga.

No caso de compensado de lâminas da mesma espécie e obtidas por desenrolamento, o plano xy coincide com o plano longitudinal-tangencial da madeira de origem (LT), e os valores \bar{E}_x e \bar{E}_y segundo MARCH (1944) podem ser calculados da seguinte forma:

$$\bar{E}_x = \frac{H}{E_b} \quad ; \quad \bar{E}_y = \frac{H}{E_a} \quad (11)$$

sendo,

$$H = \frac{E_a \cdot E_b - E_L^2 \cdot v_{TL}^2}{\lambda} \quad (12)$$

$$\lambda = 1 - v_{LT} v_{TL} \quad (13)$$

$$E_a = \frac{h_1 E_L + h_2 E_T}{h} \quad (14)$$

$$E_b = \frac{h_1 E_T + h_2 E_L}{h} \quad (15)$$

onde;

h_1 = soma das espessuras das lâminas com fibras paralelas a x

h_2 = soma das espessuras das lâminas com fibras paralelas a y

h = espessura total do painel igual a $h_1 + h_2$

E_L = módulo de elasticidade da madeira de origem na direção longitudinal

E_T = módulo de elasticidade da madeira de origem na direção tangencial

ν_{LT} = coeficiente de Poisson da espécie de origem, dado pela relação entre a deformação na direção tangencial (T) e a deformação na direção longitudinal (L), para um esforço axial na direção L.

ν_{TL} = coeficiente de Poisson da espécie de origem, dado pela relação entre a deformação na direção L e a deformação na direção T, para um esforço axial na direção T.

Os valores dos coeficientes de Poisson podem ser expressos por:

$$\bar{\nu}_{yx} = \frac{E_L}{E_a} \nu_{TL} \text{ e } \bar{\nu}_{xy} = \frac{E_L}{E_b} \cdot \nu_{TL} \quad (16)$$

A dedução de expressões teóricas para o cálculo de constantes elásticas e de resistência de painéis compensados a partir da análise teórica de MARCH (1944), tiveram uma continuidade nos trabalhos aplicados de FOREST PRODUCTS LABORATORY (1955), LISKA (1955), HOWARD & HANSEN (1962), FREAS (1964), GURFINKEL (1973), CURRY & HEARMON (1974) E FOREST PRODUCTS LABORATORY (1987).

Os trabalhos acima, visaram fundamentalmente desenvolver métodos para calcular as propriedades elásticas e de resistência do compensado a partir das propriedades das lâminas e a geometria de construção do painel, quando submetido principalmente a testes de flexão, compressão, tensão e torção.

CURRY (1954), FREAS (1956) e (1964), STIEDA (1974) e BOOTH (1990), fizeram a dedução de expressões teóricas para o cálculo das constantes \bar{E}_x , \bar{E}_y e \bar{G}_{xy} para painéis compensados cujas lâminas adjacentes possuam fibras perpendiculares entre si, a partir do conhecimento das propriedades das lâminas componentes e a geometria da seção transversal.

Assim, a distribuição dos esforços e deformações de uma placa de espessura \underline{h} de \underline{n} lâminas, submetida a um momento fletor M, é mostrada na

Figura 7. Este comportamento foi subsequentemente revisado pelos diferentes autores, mas ficou inalterado, e pelo tanto, a base principal dos estudos foi a teoria flexional de engenharia e a relação elástico-linear das tensões e deformações com contribuição das lâminas paralela e perpendicular.

GURFINKEL (1973), desenvolveu equações básicas para o cálculo dos parâmetros elásticos a partir da teoria elástico-linear aplicada a compensados trilaminados submetidos a um momento fletor M (Figura 8). Utilizando-se da teoria elástica (lei de Hooke) válida no comportamento elástico de um material homogêneo, este pesquisador determinou a distribuição de esforços equivalentes a um painel homogêneo.

Assim, da distribuição de esforços e deformações da Figura 8 (a) e (b) tem-se:

$$a) \quad M = \frac{1}{2} \varepsilon \cdot E_L \cdot b \cdot \frac{3t}{2} \cdot \frac{2}{3} \cdot 3t - \frac{1}{2} \cdot \frac{\varepsilon}{3} (E_L - E_T) \cdot b \cdot \frac{t}{2} \cdot \frac{2}{3} t = \frac{1}{2} \bar{E}_x \cdot b \cdot \frac{3t}{2} \cdot \frac{2}{3} \cdot 3t$$

$$\bar{E}_x = \frac{26}{27} E_L + \frac{1}{27} E_T \quad (17)$$

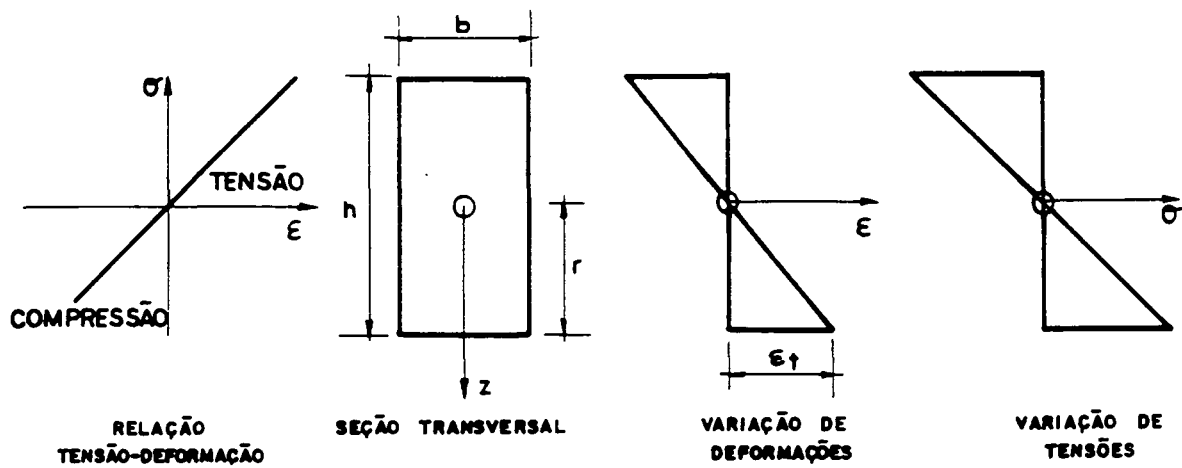
$$b) \quad M = \frac{1}{2} \varepsilon \cdot E_T \cdot b \cdot \frac{3t}{2} \cdot \frac{2}{3} \cdot 3t + \frac{1}{2} \cdot \frac{\varepsilon}{3} (E_L - E_T) \cdot b \cdot \frac{t}{2} \cdot \frac{2}{3} t = \frac{1}{2} \varepsilon \cdot \bar{E}_y \cdot b \cdot \frac{3t}{2} \cdot \frac{2}{3} \cdot 3t$$

$$\bar{E}_y = \frac{1}{27} E_L + \frac{26}{27} E_T \quad (18)$$

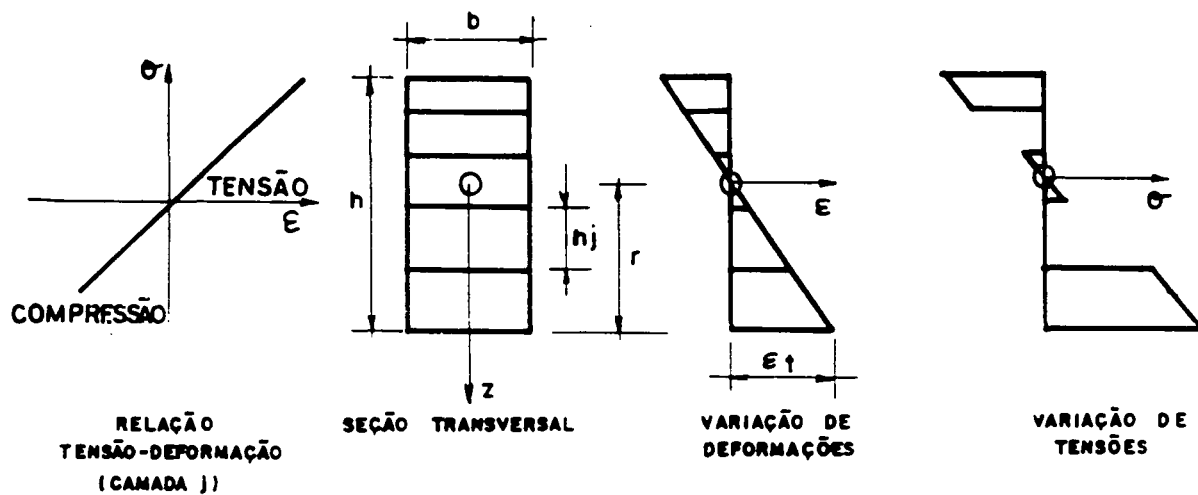
onde,

\bar{E}_x = módulo de elasticidade efetivo de um compensado em flexão, com a direção da grã da face paralela ao vão

\bar{E}_y = módulo de elasticidade efetivo de um compensado em flexão, com a direção da grã da face perpendicular ao vão

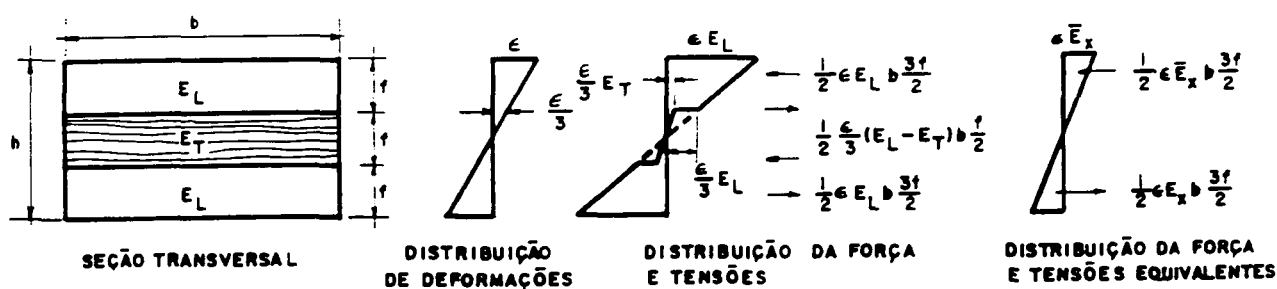


A

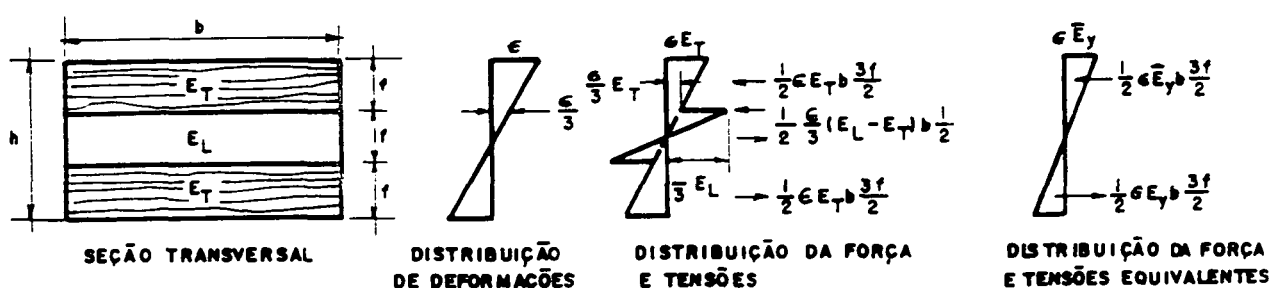


B

FIGURA 7- COMPORTAMENTO ELÁSTICO LINEAR. a) VARIAÇÃO DOS ESFORÇOS E DEFORMAÇÕES NA SEÇÃO TRANSVERSAL DE UMA LÂMINA; b) VARIAÇÃO DOS ESFORÇOS E DEFORMAÇÕES NA SEÇÃO TRANSVERSAL DE MULTICAMADAS. (BOOTH, 1990).



(a)



(b)

FIGURA 8- DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE À FLEXÃO NUM PAINEL COMPENSADO. a) FLEXÃO COM A GRÃ DA LÂMINA DA CAPA PARALELA AO VÃO; b) FLEXÃO COM A GRÃ DA LÂMINA DA CAPA PERPENDICULAR AO VÃO. (GURFINKEL, 1973).

O procedimento acima conduz às equações gerais de \bar{E}_x e \bar{E}_y , conhecido como "método exato" de cálculo de constantes elásticas FREAS (1964). Assim,

$$\bar{E}_x = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^n (E_x)_i \cdot I_i \quad ; \quad \bar{E}_y = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^n (E_y)_i \cdot I_i \quad (19)$$

onde,

I = momento de inércia de toda a seção transversal, em relação ao eixo neutro da seção; sendo $I = 1/12 \cdot b \cdot h^3$

I_i = momento de inércia da seção transversal do i -ésima lâmina em relação ao eixo neutro do compensado.

Diversos autores, ETHINGTON (1960), BIBLIS (1966), MOODY (1974), BRAUN (1977), BODIG & JAYNE (1982) e RIBEIRO (1986), desenvolveram pesquisas utilizando a equação geral (10) para determinar as propriedades elásticas em vigas laminadas e compensados, considerando também o método de homogeneização das seções para o cálculo.

Da teoria de resistência dos materiais, a homogeneização da seção é baseada na equivalência da força total interna e na proporcionalidade dessa força em relação aos parâmetros elásticos dos materiais que fazem parte da seção transversal. Esta homogeneização pode ser dividida em dois aspectos; desprezando-se o efeito das deformações devido ao esforço cortante, isto é, considerado apenas o E (transformação horizontal) e considerando o efeito das deformações devido ao esforço cortante, ou seja, considerando o E e o módulo de deformação transversal G (transformação vertical).

Nos métodos utilizados para homogeneização da seção horizontal, distinguem-se duas abordagens: em uma a largura é constante fazendo-se a homogeneização através dos E_s das lâminas e na outra a largura é modificada (largura homogeneizada) mantendo-se constantes os E_s das lâminas.

Em geral todas as normas internacionais utilizam este método de homogeneização com algumas modificações dos parâmetros que influenciam na resistência das lâminas (CARRASCO, 1989).

Assim, a seção transversal de uma peça de compensado pode ser considerada como sendo composta por dois tipos de materiais intercalados, tendo diferentes valores de módulos de elasticidade. O primeiro tipo é representado pelas lâminas com fibras normais ao plano da seção e módulo de elasticidade E_L . O segundo tipo de material é representado pelas lâminas com fibras paralelas ao plano da seção e com módulo de elasticidade E_T .

Portanto, para efeito de cálculo, a seção pode ser homogeneizada para uma seção de um único material, e a transformação é feita com base na relação dos módulos de elasticidade E_L/E_T . A Figura 9, ilustra a transformação de uma seção transversal real de um compensado numa seção homogênea com módulo de elasticidade E_L .

Os desenvolvimentos teóricos da homogeneização das seções feitas, principalmente, por BIBLIS (1966) e BODIG & JAYNE (1982), podem ser melhor explicados utilizando a notação feita por RIBEIRO (1986).

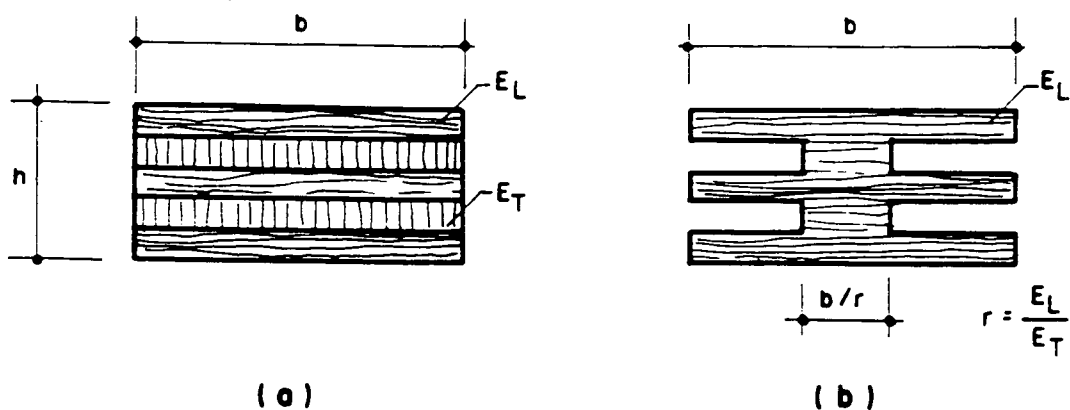


FIGURA 9- a) SEÇÃO TRANSVERSAL REAL DE UM COMPENSADO; b) SEÇÃO TRANSVERSAL HOMOGENEIZADA.

Para a determinação do módulo de elasticidade e de ruptura à flexão, considerando a seção transversal homogeneizada de um compensado composto de n lâminas de igual seção e espessura, o autor acima transformou o momento de inércia (I), utilizando as seguintes fórmulas:

$$I_{xh} = \frac{b}{12} \left(\frac{h}{n} \right)^3 \cdot \left[\left(\frac{n+1}{2} \right) + \left(\frac{n-1}{2r} \right) \right] + 2b \left(\frac{h}{n} \right)^3 \cdot \sum_{i=1}^{\frac{n+3}{4}} [2(i-1)]^2 +$$

$$+ \frac{2b}{r} \left(\frac{h}{n} \right)^3 \cdot \sum_{i=1}^{\frac{n-1}{4}} (2i-1)^2 \quad (20)$$

Analogamente na direção y tem-se I_{yh} dados por:

$$I_{yh} = \frac{b}{12} \left(\frac{h}{n} \right)^3 \cdot \left[\left(\frac{n+1}{2r} \right) + \left(\frac{n-1}{2} \right) \right] + \frac{2b}{r} \left(\frac{h}{n} \right)^3 \cdot \sum_{i=1}^{\frac{n+3}{4}} [2(i-1)]^2 +$$

$$+ 2b \left(\frac{h}{n} \right)^3 \cdot \sum_{i=1}^{\frac{n-1}{4}} (2i-1)^2 \quad (21)$$

A determinação do módulo de elasticidade e de resistência à flexão é expreso por:

$$E_{xh} = \frac{(EI)_x}{I_{xh}} \quad \text{e} \quad MOR_{xh} = \frac{F \cdot l \cdot h}{8 \cdot I_{xh}}$$

onde.

- I_{xh} = momento de inércia da seção transversal homogeneizado na direção x. Analogamente na direção y (I_{yh})
 E_{xh} = módulo de elasticidade na direção x considerando seção homogeneizada. Analogamente na direção y
 MOR_{xh} = módulo de ruptura à flexão na direção x considerando a seção homogeneizada. Analogamente na direção y
 $(EI)_x$ = módulo de rigidez à flexão na direção x. Analogamente na direção y
 h = espessura total do compensado
 b = largura de seção transversal
 n = número total de lâminas
 F = carga de colapso em flexão
 l = vão do corpo de prova em flexão
 r = E_L/E_T .

Segundo FREAS (1964), GURFINKEL (1973) e FOREST PRODUCTS LABORATORY (1987), quando todas as lâminas que compõem o painel compensado são da mesma espessura e mesma espécie de madeira, as equações (19) se reduzem a:

$$\bar{E}_x = \frac{1}{2n^3} \left[(E_L + E_T)n^3 + (E_L - E_T)(3n^2 - 2) \right] \quad (22)$$

$$\bar{E}_y = \frac{1}{2n^3} \left[(E_L + E_T)n^3 - (E_L - E_T)(3n^2 - 2) \right] \quad (23)$$

onde;

- E_L = módulo de elasticidade longitudinal das lâminas ou madeira com grã paralela à direção longitudinal
- E_T = módulo de elasticidade das lâminas na direção tangencial. Para lâminas faqueadas radialmente a 45° , o módulo na direção tangencial deve ser substituído pelo módulo na direção radial (E_R)
- n = número de lâminas.

As equações acima para o caso particular de $n=3$ se reduzem a:

$$\bar{E}_x = \frac{1}{3}(2E_L + E_T) \quad (24)$$

$$\bar{E}_y = \frac{1}{3}(2E_L + 2E_T) \quad (25)$$

RIBEIRO (1986) determinou a relação entre o módulo de elasticidade longitudinal (E_L) e módulo de elasticidade tangencial (E_T) através de ensaios de compressão paralela e perpendicular às fibras em corpos de prova de madeira sólida da espécie em estudo. A relação encontrada no caso de *Araucaria augustifolia* foi de 39.5. BODIG & JAYNE (1982), apresentou a relação $E_T = E_L/35$ para lâminas de coníferas, em geral produzidas por corte rotatório.

HOWARD & HANSEN (1962), usando as equações (22) e (23) para cálculo de constantes elásticas de compensados, utilizou valores de E_L obtidos através de testes de flexão estática, em corpos de prova de madeira sólida e valores de E_T a partir da relação $0,045 \cdot E_L$.

FOREST PRODUCTS LABORATORY (1955/87); HOWARD & HANSEN (1962); FREAS (1964); GURFINKEL (1973); CURRY & HEARMON (1974) e BODIG & JAYNE (1982) apresentaram expressões para o cálculo das propriedades de resistência do

compensado submetido à flexão. Estes autores utilizaram basicamente a análise teórica proposta por MARCH (1944).

Algumas teorias baseadas no comportamento elástico dos materiais não têm validade na sua aplicação até a falha do material, mas, valores de módulo de ruptura aparente de compensados, obtidos através das mesmas considerações teóricas feitas para o regime elástico, diferem dos valores reais observados somente num fator constante (FREAS, 1964 e CURRY & HEARMON, 1974).

Assim, a resistência máxima à flexão num compensado pode ser calculado a partir das expressões utilizadas na determinação da tensão no limite proporcional.

Segundo FREAS (1964) e GURFINKEL (1973) teoricamente o momento (M) de uma viga compensada até o limite proporcional é dado pela seguinte expressão:

$$M = K \cdot F_a \cdot (I/c) \quad (26)$$

onde,

K = constante empírica

F_a = tensão no limite proporcional

I = momento de inércia da seção em relação ao eixo neutro

c = distância do centróide da seção a fibra mais externa paralela ao vão.

A constante K foi determinada experimentalmente por FREAS (1964), sendo igual a 0,85 para compensados com a direção da grã mais externa paralela ao vão e 0,90 para compensados com grã da face transversal ao vão.

A tensão no limite proporcional de um compensado com a direção da grã da face paralela ao vão (F_{al}) e perpendicular (F_{at}), é dada pelas seguintes equações:

$$F_{al} = (\bar{E}_x / E_L) \cdot F_L \quad (27)$$

$$F_{at} = (\bar{E}_y' / E_L) \cdot F_L \quad (28)$$

onde,

F_L = tensão no limite proporcional da madeira à flexão na direção longitudinal
 \bar{E}_y' = módulo de elasticidade efetivo do compensado à flexão com a direção da grã da face transversal ao vão, considerando-se, inefetiva a última lâmina (contra capa) em tensão perpendicular ao vão.

Quando todas as lâminas do compensado são da mesma espessura e espécie de madeira, as equações (27) e (28) podem ser expressas da seguinte forma:

$$F_{al} = (1/I) \cdot (r \cdot I_T + I_L) \cdot F_L \quad (29)$$

$$F_{at} = (1/I) \cdot (r \cdot I_T' + I_L) \cdot F_L \quad (30)$$

onde,

I_T e I_L = momentos de inércia de todas as lâminas perpendiculares e longitudinais ao vão com relação a linha média da seção.

I_T' = momento de inércia com respeito a linha média da seção de todas as lâminas transversais ao vão, exceto, a última lâmina do lado em tração.

r, I e F_L = definidos previamente.

Para o cálculo da resistência máxima à flexão do compensado ou módulo de ruptura aparente (F_r), os autores acima sugerem a utilização das mesmas relações apresentadas para a tensão no limite proporcional, substituindo-se nas equações (27) e (28) F_L por F_M , onde este último equivale ao módulo de ruptura da

madeira na direção longitudinal. A constante empírica, no caso, do momento máximo calculado a partir da fórmula (26), foi determinada igual a 0,85 para compensados de três ou mais lâminas com a direção da grã da face mais externa paralela ao vão, 1,15 para compensados de três lâminas com a direção da grã da face perpendicular ao vão e 1,00 para compensados de cinco ou mais lâminas com a grã da face também transversal ao vão.

CURRY (1954), FOREST PRODUCTS LABORATORY (1955/87), FREAS (1956/64), GURFINKEL (1973) e STIEDA (1974), desenvolveram também equações teóricas de predição das propriedades elásticas e de resistência do compensado sujeito à tração, compressão e cisalhamento, a partir da análise teórica de MARCH (1944). Assim, expressões que relacionam principalmente as características geométricas da seção do painel e as propriedades da espécie de madeira, são apresentadas no Anexo 1.

A maioria dos pesquisadores citados acima sustentaram, que, uma forma de cálculo aproximada dos módulo efetivos e resistência, na qual o erro seja desprezível (em torno de 1%), consiste em considerar como atuantes apenas as lâminas com fibras paralelas à direção, em relação à qual está se calculando o valor de E , F_r ou F_a efetivos, exceto no caso de compensados de três lâminas.

LISKA (1955), realizou a determinação experimental das propriedades elásticas e de resistência na compressão de compensados feitos de Douglas fir e Sitka spruce com lâminas da mesma espessura. A comparação entre os resultados experimentais e os teóricos derivados das equações de MARCH apresentou boa concordância.

O trabalho de LISKA concluiu que as propriedades elásticas e de resistência do compensado à compressão sob tensão na direção paralela ou perpendicular à direção das fibras da face, podem ser determinadas teoricamente a partir dos dados disponíveis para madeira sólida, e que, o efeito das lâminas com direção da grã

perpendicular à direção do esforço aplicado, nas propriedades elásticas e de resistência à compressão é pequeno, quando comparado ao das lâminas com fibras paralelas ao esforço aplicado, o que implica, uma boa aproximação das propriedades na compressão considerando-se apenas as lâminas com fibras paralelas à direção do esforço aplicado, quando utilizado o cálculo teórico.

NORRIS & MCKINNON (1956), apresentaram um estudo das propriedades elásticas e de resistência do compensado de Yellow poplar sujeito a esforços no seu plano, com direções variadas em relação as fibras. São também apresentadas equações teóricas para o cálculo dos módulos de elasticidade e das propriedades de resistência do compensado sujeito à tração, compressão e cisalhamento na chapa para diversos ângulos. Os ensaios de tração reveiaram resultados para o módulo de elasticidade concordantes com a teoria de elasticidade. Os valores do módulo de elasticidade obtidos dos ensaios à compressão variaram entre os valores máximos e mínimos preditos pela teoria. Os valores da tensão no limite proporcional dos ensaios de tração e compressão em várias direções se mostraram razoavelmente próximos dos valores teóricos.

FREAS (1964), estudou as propriedades elásticas e de resistência à flexão do compensado, visando estabelecer métodos de cálculos para estas, a partir das lâminas individuais.

De acordo com este autor, o módulo de elasticidade aparente na flexão E_c , é uma composição dos módulos das lâminas em duas direções principais. Assim, E_c pode ser obtido pela utilização das equações usuais com dados dos ensaios de tração, compressão ou de flexão. Neste caso, deve ser efetuada uma correção, tendo-se em conta às deformações por cisalhamento. As equações de cálculo apresentados para o módulo de elasticidade efetivo na flexão são os mesmos apresentados por MARCH (1944). O autor cita também os resultados obtidos para o valor de E_c através da ampla experimentação de corpos de prova à flexão e ressalta

a boa concordância dos valores observados com os valores preditos pelo modelo proposto.

Os ensaios de flexão foram realizados com corpos de prova biapoiados e a determinação dos valores experimentais de E_c foi através da equação:

$$w = \frac{Pa^3}{48E_cI} (1 - \nu_{LT} \nu_{TL}) \cdot B \left(1 + e \frac{h^2}{a^2} \right) \quad (31)$$

na qual w é a flecha medida, P a carga aplicada no centro do vão, a o vão, I momento de inércia de toda seção considerada como de um único material, ν_{LT} e ν_{TL} são os coeficientes de Poisson associados às direções longitudinal e tangencial, h é a espessura do corpo de prova.

O fator $(1 - \nu_{LT} \nu_{TL}) \cdot B$ leva em conta a diferença na flecha ao longo da largura do corpo de prova, resultante da curvatura anticlástica, sendo seu valor, da ordem de 0.99, podendo ser desprezível quando se utiliza a razão vão/largura indicada pela norma ASTM (1946/82).

O fator $(1 + e \cdot h^2/a^2)$ é a correção da flecha devido às deformações por cisalhamento. Este fator varia entre 1,01 e 1,13 dependendo do tipo de construção de compensado considerada.

Segundo FREAS (1964) a não consideração das lâminas com fibras perpendiculares ao vão não provoca erros apreciáveis.

Segundo BIBLIS (1966), para relações altas de vão/altura os efeitos da deformação por cisalhamento são pequenos, e ignorá-las não traz consequências sérias e a equação (10) pode ser utilizada para o cálculo das constantes elásticas em madeira laminada e compensados.

De acordo com FOREST PRODUCTS LABORATORY (1987), a maioria dos compensados utilizados industrialmente e que são submetidos a esforços de flexão

a relação vão/altura é alta e o efeito da deformação por cisalhamento pode ser desprezível.

BIBLIS (1969), determinou a influência das deformações por cisalhamento no ensaio de flexão para diversas relações entre vão e espessura em compensados de Southern pine. Para a relação 48:1 em corpos de prova com a grã da face paralela ao vão, as flechas devidas ao cisalhamento foram 7,5 e 5,1% da flecha total no meio do vão para compensados de três e cinco lâminas respectivamente. Para a relação vão/altura igual a 14:1, em corpos de prova de três lâminas, com fibra da face paralela ao vão, a percentagem da flecha no meio do vão é ligeiramente superior à percentagem da flecha causada pela flexão pura.

Segundo CARRASCO (1989), o fato da influência do esforço cortante ser desprezado, quando a relação vão/altura é acima de 21 é bastante aceito na atualidade. Assim, a equação (10) que considera unicamente o efeito das deformações provocadas pelo momento fletor, pode ser utilizada nos cálculos de constantes elásticas de compensados ou outras formas laminadas sem grandes erros.

KEENAN (1973), determinou os coeficientes de Poisson e os módulos de elasticidade em corpos de prova de compensados de Douglas fir, solicitados axialmente à tração e à compressão. As deformações foram medidas através de extensômetros elétricos de resistência.

O autor não conseguiu verificar as equações de simetria elástica: $\nu_{LR}/E_L = \nu_{RL}/E_R$; $\nu_{LT}/E_L = \nu_{TL}/E_T$ e $\nu_{RT}/E_R = \nu_{TR}/E_T$, embora a discrepância encontrada não tenha sido muito grande.

Os coeficientes de Poisson ν_{RL} e ν_{TL} são muito pequenos e a sua determinação precisa é muito difícil. Quando for admitida simetria elástica, o autor acima recomenda a adoção de coeficientes calculados a partir das relações de simetria, no lugar de determiná-los experimentalmente.

McLAIN & BODIG (1974), estudando a relação do módulo de elasticidade em compensados de diferentes tamanhos, desconsideraram a influência dos coeficientes de Poisson, pois são raramente utilizados em cálculos estruturais que envolvem compensados.

A diferença de valores do módulo de elasticidade na madeira através dos diferentes testes utilizados nas pesquisas de constantes elásticas, é hoje uma das conclusões mais frequentes, e a influência da deformação de cisalhamento passa a ser relevante.

NEWLIN & TRAYER (1953) citado por BIBLIS (1969), encontraram que o módulo de elasticidade da madeira sólida submetido a teste de flexão estática com uma relação vão/altura de 14:1 é aproximadamente 10% menor que o módulo de elasticidade resultante de testes de tração e compressão.

BIBLIS (1965/66), estudando doze espécies americanas encontrou diferenças maiores entre estes módulos de elasticidade, alcançando um valor máximo de 37%. Este autor concluiu que a porcentagem de deflexão por efeito de cisalhamento da deformação total da viga em flexão, depende além da razão vão/altura, da razão entre o módulo de elasticidade puro (E) e módulo de rigidez (G) ambos paralelos a grã. Esta razão é característica para cada espécie, não depende da massa específica e varia consideravelmente entre as espécies.

Com relação aos planos de simetria da madeira, dois módulos de rigidez influenciam a deformação de um painel compensado submetido a flexão. Assim, tem-se o módulo de rigidez (G_{LT}) associado com a deformação de cisalhamento no plano longitudinal-tangencial, comum nas lâminas obtidas por desenrolo, e o módulo de rigidez (G_{LR}) associado com a deformação de cisalhamento no plano longitudinal-radial, no caso de lâminas obtidas por faqueamento radial. A deformação no plano radial-tangencial não tem influência importante na viga carregada (WOODSON, 1973).

Valores de módulo de elasticidade paralelo à grã são avaliados constantemente para muitas espécies, mas dados de módulo de rigidez (G) são ainda limitados em compensados. Na ausência destes dados os valores de G são frequentemente obtidos através do módulo de elasticidade paralelo (E_L), e segundo FOREST PRODUCTS LABORATORY (1955/87) estes valores são $G_{LT}/E_L \approx 0,06$ e $G_{LR}/E_L \approx 0,075$.

Assim, vários têm sido os intentos em determinar estas constantes elásticas em compensados e outros painéis a base de madeira, em função dos módulos de elasticidade da madeira original ou desenvolvendo testes específicos em placas para determinar um módulo de rigidez efetivo (G).

MARCH et al. (1942) apresentaram uns dos primeiros trabalhos visando a determinação do módulo de elasticidade transversal efetivo (G) para a solução de problemas estruturais, nos quais eram empregados chapas planas de compensados. Estes autores foram os primeiros a sugerir e utilizar o ensaio de torção de placas quadradas, que mais tarde foi adotado pela ASTM como Método D-3044.

Este método até hoje é utilizado para determinar o módulo de rigidez de materiais ortotrópicos, onde não pode ser obtido através do conhecimento do módulo de elasticidade paralelo e a razão de Poisson. O cálculo desta constante é importante no empenamento das chapas.

HEARMON & ADAMS (1952), utilizando a teoria de placas ortotrópicas, realizaram ensaios de flexão e torção pura em compensados, verificando uma boa concordância entre os valores teóricos e experimentais.

BIBLIS & LEE (1976) demonstraram através de estudos experimentais em compensados, que o módulo de elasticidade transversal (G_{xy}) pode ser obtido de modo simples e preciso, medindo-se a flecha média nos extremos da diagonal da placa submetida a torção, segundo o método da ASTM.

Estes autores também apresentaram resultados da variação de G_{xy} com a variação da relação entre o lado da placa e a espessura (l/h). Na maioria dos casos, os valores de G_{xy} crescem linearmente com o acréscimo desta relação.

Segundo MARCH (1944) e FOREST PRODUCTS LABORATORY (1955/87), o módulo de elasticidade transversal efetivo G_{xy} num compensado é definido de maneira análoga ao módulo de elasticidade longitudinal como na equação (10), assim:

$$\bar{G}_{xy} = \frac{1}{h} \left[\sum_{i=1}^n h_i (G_{xy})_i \right] \quad (32)$$

$$\bar{G}_{xyf} = \frac{1}{I} \left[\sum_{i=1}^n I_i (G_{xy})_i \right] \quad (33)$$

onde,

\bar{G}_{xy} = módulo de rigidez do compensado submetido a cisalhamento e não a flexão

\bar{G}_{xyf} = módulo de rigidez do compensado submetido à flexão

$(G_{xy})_i$ = módulo de rigidez da i -ésima lâmina.

Para o compensado de n lâminas da mesma espécie, o valor $(G_{xy})_i$ é igual para todas as lâminas, e $\bar{G}_{xy} = \bar{G}_{xyf} = G_{LT}$ para lâminas obtidas por desenrolo e $\bar{G}_{xy} = \bar{G}_{xyf} = G_{LR}$ para lâminas faqueadas radialmente. Valores de G_{LT} e G_{LR} podem ser calculadas das relações G/E_L .

De acordo com FOREST PRODUCTS LABORATORY (1987), o cálculo de G num compensado para qualquer ângulo da grã de face é:

$$\frac{1}{G_{\theta}} = \frac{1}{\overline{G}_{xy} \text{ ou } \overline{G}_{xyf}} \cos^2 2\theta + \left[\frac{1}{\overline{E}_x} + \frac{1}{\overline{E}_y} \right] \sin^2 2\theta \quad (34)$$

A relação acima permite calcular um valor máximo para G_{θ} quando $\theta = 45^{\circ}$, e assim, as deformações por efeito de cisalhamento podem ser reduzidas pela orientação da grã da face do compensado a 45° com respeito ao eixo, nas vigas tipo I e celular. A equação (34) para este caso particular de $\theta = 45^{\circ}$ reduz-se a:

$$G_{45^{\circ}} = \frac{\overline{E}_x \cdot \overline{E}_y}{\overline{E}_x + \overline{E}_y} \quad (35)$$

Esta fórmula permite o cálculo de um valor máximo em compensados com as camadas paralelas à grã, da mesma área e nas duas direções principais. Assim, $\overline{E}_x = \overline{E}_y = 1/2 (E_L + E_T)$, e o módulo de rigidez é então:

$$\text{máx } G_{45^{\circ}} = \frac{1}{4} (E_L + E_T) \quad (36)$$

Para lâminas faqueadas radialmente, E_T deve ser substituído por E_R .

WOODSON (1973), estudou a relação entre o módulo de rigidez, o módulo de elasticidade paralelo e a massa específica, em compensados feitos com lâminas obtidas por desenrolo e compensados feitos com lâminas faqueadas radialmente. Os resultados mostraram nenhuma relação entre G_{LT} e G_{LR} com a massa específica para valores de 0,54; 0,59 e 0,66 g/cm³. Um outro resultado foi um valor médio semelhante para G_{LT} e G_{LR} e igual a 118 psi, concordantes aos valores encontrados por outros autores, tais como, MARK et al. (1970) e BIBLIS (1971). A razão G/E para a madeira de Southern pine não foi constante através dos corpos de prova e sendo aproximadamente de 15,2.

2.4.4 Fatores que influenciam nas propriedades do compensado

Segundo LUTZ (1971), as propriedades físico-mecânicas da madeira de maior interesse para a produção de lâminas são a massa específica, permeabilidade e contração, módulo de elasticidade e ruptura, cisalhamento em compressão paralela e perpendicular às fibras, tração perpendicular à grã e dureza. Estas afirmações também encontram-se por ordem de importância segundo o uso na NORMA PS 1-83 (APA).

A influência de tratos silviculturais aplicados intensamente em reflorestamento, como por exemplo desbastes, práticas de poda e menor ciclo de rotação, afetou a qualidade da madeira (BUNN, 1981). Assim, mudanças em variáveis, tais como massa específica, tamanho de nós, distribuição de nós e largura dos anéis de crescimento é esperada, e portanto, as propriedades das lâminas obtidas desta matéria-prima dependeram destas mudanças.

De acordo com BIER (1983b), é essencial determinar como estas mudanças, em particular, a massa específica e o tamanho de nós, podem afetar as propriedades mecânicas em compensados de *Pinus*, e assim predizer adequadamente o seu desempenho estrutural. Algumas mudanças na magnitude destas propriedades afetaram diretamente as tensões básicas de trabalho.

LUTZ (1964) observou a necessidade de se considerar a grande variação existente entre os lenhos tardio e inicial de coníferas na qualidade das lâminas destinadas à confecção de compensados.

Diversos autores estudaram as propriedades físicas e mecânicas nos dois tipos de lenho em *Pinus*, e encontraram valores de massa específica em torno de $0,3 \text{ g/cm}^3$ para o lenho inicial e $0,65 \text{ g/cm}^3$ a $0,90 \text{ g/cm}^3$ para o lenho tardio com uma diferença em resistência de três a cinco vezes maior neste último (VORREITER, 1949; TRENDLENBURG & MAYER-WEGELIN, 1956; LUTZ, 1964 e MUÑIZ, 1993).

Segundo LUTZ (1964), a grande diferença nas propriedades, nos dois lenhos de crescimento, é uma característica importante na confecção de compensado para uso estrutural, pois, o lenho tardio distribuído nas lâminas fornece uma maior resistência ao painel.

De acordo com o autor acima, a maioria das lâminas obtidas de madeira que tem anéis de crescimento estreitos possuem uma boa distribuição de lenho tardio, e conseqüentemente melhor resistência. Ao contrário, nas madeiras que possuem anéis de crescimento largos, é necessário que o lenho tardio represente no mínimo 50% do anel anual para se obter lâminas com propriedades semelhantes as anteriores. O trabalho conclui também que lâminas com ao menos dois anéis de crescimento ou mais através da espessura, reduzem durante o processo de corte a profundidade das fendas e a separação do lenho tardio e inicial produzida pela faca e o empenamento das lâminas.

BIER (1983a) apresentou um estudo sobre as relações entre as propriedades de resistência à flexão e as propriedades físicas em compensados de *Pinus radiata*. Foram apresentados modelos de regressão que melhor explicaram a relação entre o módulo de elasticidade (E) e o módulo de ruptura (MOR) do compensado, com a massa específica nominal do painel (D_{nom}), a massa específica das lâminas (D_{ven}), a taxa de nós (K_{nr}) e o tamanho máximo de nós ($K_{máx}$).

Os resultados deste trabalho evidenciaram pouca relação entre o módulo de ruptura com a massa específica do compensado e as lâminas ao contrário do módulo de elasticidade onde teve uma grande influência. A taxa de nós tem um efeito dominante sobre a resistência do compensado e inversa sobre o módulo de elasticidade.

Por um outro lado, a regressão entre a massa específica do compensado e a massa específica das lâminas componentes, mostrou pouca correlação, que segundo o autor, deve-se a dificuldade de medição desta propriedade nas lâminas. O

conhecimento desta relação é importante para manter a construção balanceada (BODIG & JAYNE, 1982).

Os modelos que melhor se ajustaram através da análise de regressão e que podem ser usados de maneira adequada na predição de propriedades de resistência de compensados, submetidos à flexão, foram:

$$\text{MOR} = b_0 + b_1 K_{nr}$$

$$\text{MOR} = b_0 + b_1 E$$

$$\text{MOR} = b_0 + b_1 E + b_2 K_{nr}$$

$$E = b_0 + b_1 D_{nom} + b_2 K_{nr}$$

$$E = b_0 + b_1 D_{ven}$$

BIER (1983 b) reporta equações teóricas para predizer as propriedades de resistência em compensados de *Pinus radiata* em função do tamanho dos nós e as mudanças de inclinação da grã em torno dos mesmos.

As equações apresentadas mostraram que a rigidez e resistência do compensado podem ser conhecidos a partir das características do agrupamento dos nós presentes nas lâminas e de valores de resistência obtidos de pequenos corpos de prova, isentos de defeitos. As equações que melhor se ajustaram neste trabalho foram:

$$E = E_0 (1 - \beta_E \cdot K_{nr})$$

$$\text{MOR} = S \cdot R_{clear} (1 - 1,4 \cdot K_{nr})$$

onde,

E = módulo de elasticidade do compensado

E₀ = módulo de elasticidade calculado de corpos de prova paralelo à grã

β_E	=	fator de amplificação dos nós (tabelado)
K_{nr}	=	taxa de nós
MOR	=	módulo de ruptura do compensado
R_{clear}	=	módulo de ruptura determinado de corpos de prova
S	=	fator de correção, aproximadamente igual 0,67.

BIER (1984) apresentou em um outro estudo a influência da massa específica nas propriedades elásticas e de resistência do compensados estruturais de *Pinus*.

Os resultados obtidos por este autor mostram que apesar da grande dispersão nos dados, evidenciou-se sempre um aumento nas propriedades de rigidez e resistência à flexão e compressão paralela às fibras com o aumento da massa específica do painel.

Outro resultado relevante foi que para uma distribuição de frequências da massa específica dos compensados quase homogênea, existe, sempre uma distribuição quase unimodal nas frequências das propriedades de rigidez e resistência. As razões deste comportamento segundo o autor pode ser atribuídos à grande diferença de densidades entre as lâminas componentes do painel e também as características da última lâmina submetida à tensão que governa a resistência à flexão no corpo de prova, e que no caso de possuir uma maior percentagem de lenho inicial, resultará em baixa resistência do compensado para uma massa específica aparentemente alta.

Relações entre as propriedades de resistência do painel submetido à compressão e a massa específica podem também ser derivadas de relações de resistência à compressão e massa específica da madeira sólida de origem. Os

modelos que melhor explicaram o ajuste das variáveis na flexão estática foram os seguintes:

$$\text{MOR}_p = b_0 + b_1 E_p$$

$$\text{MOR}_p = b_0 + b_1 E_p + b_2 D_{\text{nom}}$$

$$\text{MOR}_T = b_0 + b_1 E_T + b_2 D_{\text{nom}}.$$

MOR_p e MOR_T = módulo de ruptura do compensado em flexão paralela e perpendicular à grã da lâmina da face

E_p e E_T = módulo de elasticidade do compensado em flexão estática paralelo e perpendicular à grã da lâmina da face

D_{nom} = massa específica do compensado.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 ESPÉCIES ESTUDADAS

Foram estudadas as madeiras de *Pinus elliotii* Engelm var *elliotii* e *Pinus taeda* L., provenientes de plantios de 30 anos de idade, localizados na Floresta Nacional de Irati, Paraná. Foram escolhidas por serem as espécies mais importantes do gênero no sul do país, e por serem de interesse crescente na produção de compensados na região.

3.2 AMOSTRAGEM E COLETA DO MATERIAL

A seleção das árvores para o estudo, dentro de cada talhão, obedeceu a critérios previamente estabelecidos quanto à classe diamétrica e aspecto visual do fuste.

Para evitar variações acentuadas devido às diferentes taxas de crescimento, foram consideradas apenas as árvores com DAP médio, pertencentes à classe diamétrica de 47 ± 2 cm.

Para o fuste, selecionaram-se árvores com tronco cilíndrico, reto, sem bifurcações ou defeitos, para se evitar a excessiva presença de lenho de compressão e defeitos que inviabilizassem a obtenção de corpos de prova ou que pudessem influir nos resultados.

Após a seleção, foram obtidas 3 árvores por espécie, procedendo-se às medições de diâmetro e altura comercial (15 cm), cujas médias encontram-se na Tabela 1.

De cada árvore foram coletados quatro toretes de aproximadamente 1,20 m de comprimento, tomados nos primeiros oito metros, conforme apresentado na Figura 10.

TABELA 1- MÉDIA DE DAP E ALTURA COMERCIAL DAS ÁRVORES COLETADAS

ESPÉCIE	DAP(cm)		ALTURA(m)	
	MÉDIA	DESVIO PADRÃO	MÉDIA	DESVIO PADRÃO
<i>Pinus elliottii</i>	46,70	1,893	28,30	1,07
<i>Pinus taeda</i>	47,80	1,814	37,41	1,19

O corte das toras foi realizado a partir de aproximadamente 60 cm do nível do solo, para se evitar a influência do sistema radicular das árvores, a possível presença de lenho de compressão e, também para se obter resultados mais representativos da porção do tronco aproveitado comercialmente como madeira sólida ou lâminas.

As toras, depois de codificadas, tiveram os topos selados para evitar a perda de umidade.

O sistema de amostragem utilizado foi eleito no sentido de se obter uma menor variabilidade longitudinal entre as propriedades físicas e mecânicas da madeira sólida e as lâminas para fabricação de compensados. A seção da tora dos primeiros oito metros, destinada ao estudo, foi eleita por ser esta parte da árvore, normalmente, a mais utilizada pelas indústrias no processo de laminação.

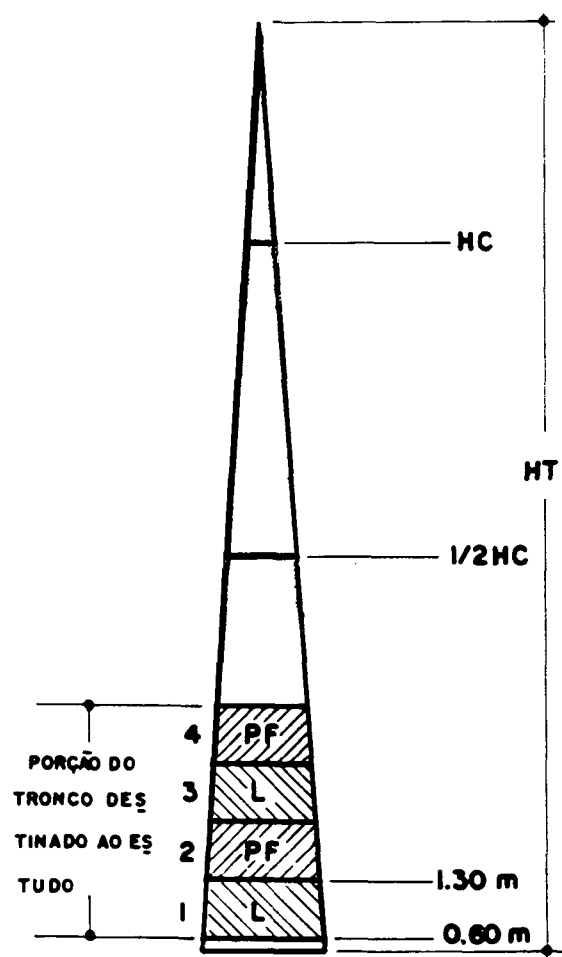


FIGURA 10- ESQUEMA DA RETIRADA DO MATERIAL PARA O ESTUDO.

- HC - Altura comercial
- HT - Altura total
- L - Toretes utilizados para laminação
- PF - Toretes utilizados para propriedades físicas e mecânicas da madeira

3.3 ESTUDO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DA MADEIRA

As propriedades da madeira que foram estudadas neste trabalho no sentido medula-casca, foram as seguintes:

- propriedades mecânicas de flexão estática, compressão paralela e perpendicular à grã;
- massa específica aparente.

3.3.1 Determinação das propriedades mecânicas

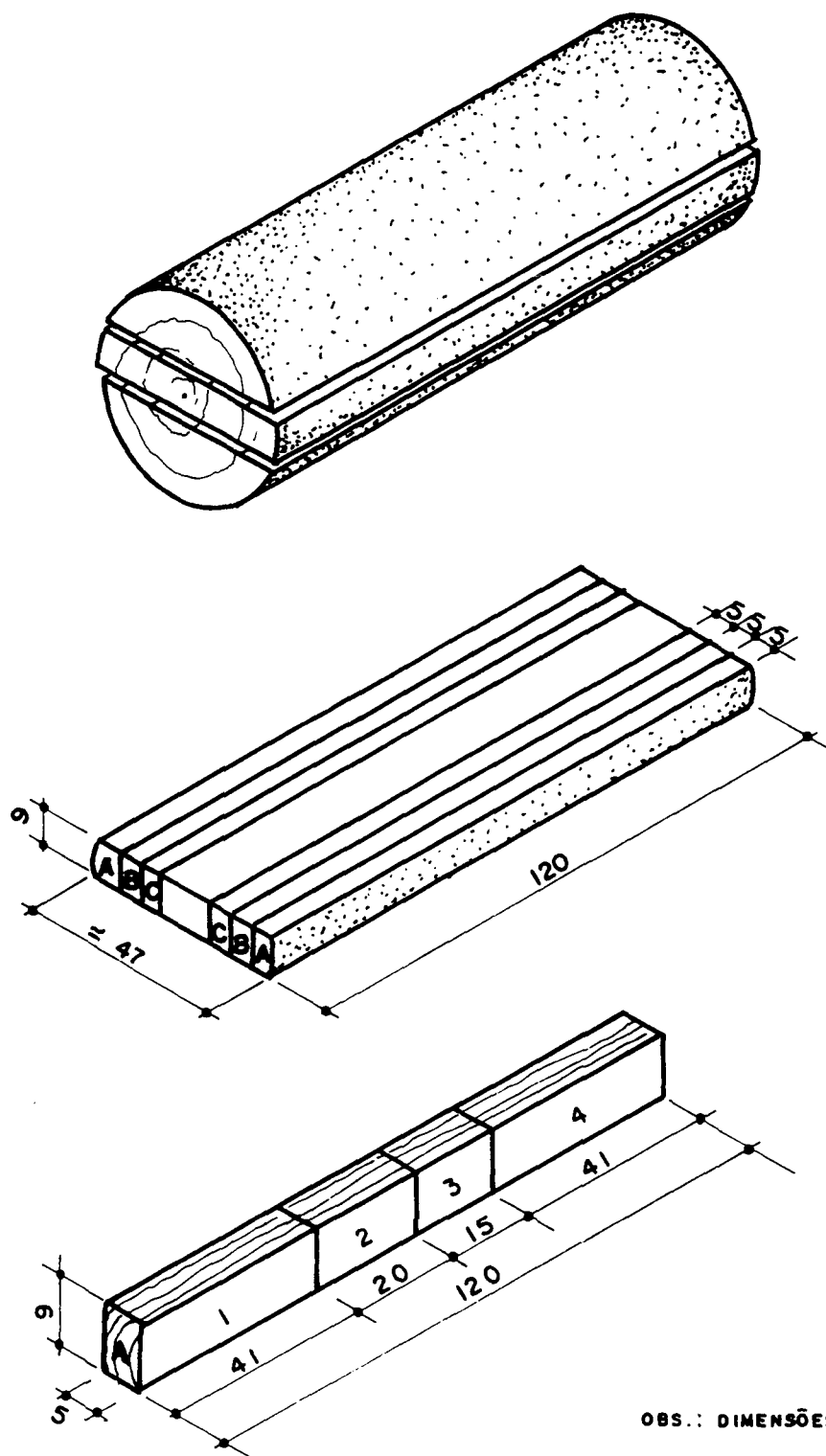
Terminada a amostragem, as toras destinadas ao estudo das propriedades físicas e mecânicas foram transportadas para a serraria e desdobradas obtendo-se, de cada amostra, um pranchão central de 9 cm de espessura por 1,20 m de comprimento com a medula no centro, como indicado na Figura 11.

Os pranchões foram condicionados em sacos plásticos e transportados para o Laboratório de Tecnologia da Madeira da Universidade Federal do Paraná, para a secagem em estufa, confecção de corpos de prova e execução do estudo.

A secagem dos pranchões foi conduzida em estufa convencional até uma umidade média da madeira, de 12% a 14% aproximadamente.

As amostras foram confeccionadas a partir de vigotes de 9 x 5 cm de espessura, serrados dos pranchões de cada árvore, segundo as prescrições das normas recomendadas pela Comissão Panamericana de Normas Técnicas (COPANT). Em alguns casos, quando as normas COPANT não definiam os parâmetros, foram adotada a norma ASTM e a norma DIN.

Os corpos de prova foram retirados dos vigotes de forma sistemática, de três posições (A, B e C) no sentido medula-casca, de 5 cm de espessura e equivalente à mesma posição da região da tora contígua destinada a laminação, como mostrado na Figura 11.



TORETE

PRANCHÃO

CORPOS DE PROVA

- 1 E 4 - FLEXÃO ESTÁTICA
- 2 - COMPRESSÃO PARALELA ÀS FIBRAS
- 3 - COMPRESSÃO PERPENDICULAR ÀS FIBRAS

OBS.: DIMENSÕES EM cm.

FIGURA 11. ESQUEMA DA RETIRADA DOS CORPOS DE PROVA PARA O ESTUDO.

Os ensaios mecânicos foram feitos com as amostras tendo um teor de umidade de aproximadamente 12%, após acondicionamento em ambiente controlado a $20 \pm 2^\circ\text{C}$ e $65 \pm 2\%$ de UR, até obtenção de constância de massas nos corpos de provas.

As dimensões dos corpos de prova e as condições de execução dos ensaios são apresentados na Tabela 2. Para o corpo de prova utilizado nos ensaios de flexão estática, o vão foi de 41 cm, para se obter a relação vão/altura exigida pela norma, e minimizar, desta forma, o efeito de forças de cisalhamento sobre os resultados obtidos.

As deformações e cargas no limite proporcional foram obtidas de diagramas confeccionados automaticamente durante os ensaios.

O equipamento para a execução dos testes foi a máquina de ensaio universal de marca TINIUS OLSEN, com capacidade de 0,3 a 30 toneladas. Os implementos necessários aos testes executados foram: deflectômetros, suportes e equipamento auxiliar para medição automática da deformação e confecção de gráficos.

TABELA 2- PROPRIEDADES MECÂNICAS E FÍSICAS ESTUDADAS E ESPECIFICAÇÕES DE NORMAS UTILIZADAS NOS TESTES

PROPRIEDADE	DIMENSÕES DO CORPO DE PROVA (cm)	VELOCIDADE DE TESTE (mm/min)	NORMA
Flexão estática (TLP, MOR, MOE)	2,5 x 2,5 x 41,0	1,0	ASTM
Compressão paralela às fibras (TLP, MOR, MOE)	5,0 x 5,0 x 20,0	0,6	COPANT
Compressão perpendicular às fibras (TLP, MOE)	5,0 x 5,0 x 15,0	0,3	DIN
Massa específica	2,5 x 2,5 x 10,0	-	COPANT

TLP - Tensão no limite proporcional. MOR - Módulo de ruptura. MOE - Módulo de elasticidade.

Com os resultados dos testes e os diagramas de carga-deformação procederam-se os cálculos dos módulos de ruptura, módulo de elasticidade e tensão no limite proporcional, através das fórmulas:

Flexão estática:

$$\text{MOR} = 3/2 (P_{\text{máx}} \cdot L)/(b \cdot h^2) \quad (\text{kgf/cm}^2)$$

$$\text{MOE} = 1/4 (P_{\text{LP}} \cdot L^3)/(d_{\text{LP}} \cdot b \cdot h^3) \quad (\text{kgf/cm}^2)$$

$$\text{TLP} = 3/2 (P_{\text{LP}} \cdot L)/(b \cdot h^2) \quad (\text{kgf/cm}^2)$$

Compressão paralela às fibras:

$$\text{MOR} = P_{\text{máx}}/(a \cdot b) \quad (\text{kgf/cm}^2)$$

$$\text{MOE} = (P_{\text{LP}} \cdot L')/(a \cdot b \cdot d_{\text{LP}}) \quad (\text{kgf/cm}^2)$$

$$\text{TLP} = P_{\text{LP}}/(a \cdot b) \quad (\text{kgf/cm}^2)$$

Compressão perpendicular às fibras:

$$\text{TLP} = P_{\text{LP}}/A \quad (\text{kgf/cm}^2)$$

$$\text{MOE} = T_{\text{LP}}/\epsilon \quad (\text{kgf/cm}^2)$$

onde,

$P_{\text{máx}}$ = carga máxima (kgf)

P_{LP} = carga no limite proporcional (kgf)

L = comprimento do vão (cm)

L' = distância entre os apoios do dispositivo registrador das deformações (cm)

d_{LP} = deformação correspondente à carga no limite proporcional (cm)

$h = a$ = altura do corpo de prova (cm)

b = largura do corpo de prova (cm)

A = área do corpo de prova sujeita ao esforço (cm²)

$\varepsilon = \Delta h/h$ = deformação do corpo de prova submetido à compressão perpendicular às fibras (cm).

3.3.2 Determinação da massa específica

A determinação da massa específica aparente, foi realizada através de amostra retiradas perto da região da fratura do corpo de prova de flexão estática, segundo a seguinte relação:

$$Mea = M_{12}/V_{12} \text{ (g/cm}^3\text{)}$$

onde,

Mea = massa específica aparente da madeira acondicionada em ambiente controlado a $20 \pm 2^\circ\text{C}$ e $65 \pm 2\%$ de UR.

M_{12} = massa do corpo de prova em 12% de teor de umidade, em g

V_{12} = volume do corpo de prova em 12% de teor de umidade, em cm^3 .

3.4 FABRICAÇÃO DE COMPENSADOS

3.4.1 Obtenção de lâminas

Após derrubadas as árvores, os toretes destinados à laminação foram codificados e selados nos dois topos com a finalidade de evitar a perda excessiva de umidade, e logo transportados à Indústria de Compensados-EK em Santa Catarina, para o processo de laminação.

Os toretes foram aquecidos com vapor de água saturado a 50°C durante 48 horas. Estas variáveis foram calculadas preliminarmente a partir de resultados obtidos por MEDINA (1986).

As toras, depois deste período, foram marcadas nos topos em três posições ou coroas circulares no sentido medula-casca, correspondente a mesma espessura e posição, dos vigotes retirados do torete contíguo para o estudo das propriedades físicas e mecânicas da madeira, como indicado na Figura 12.

As coroas circulares foram codificadas como: A (externa), B (intermediária) e C (interna).

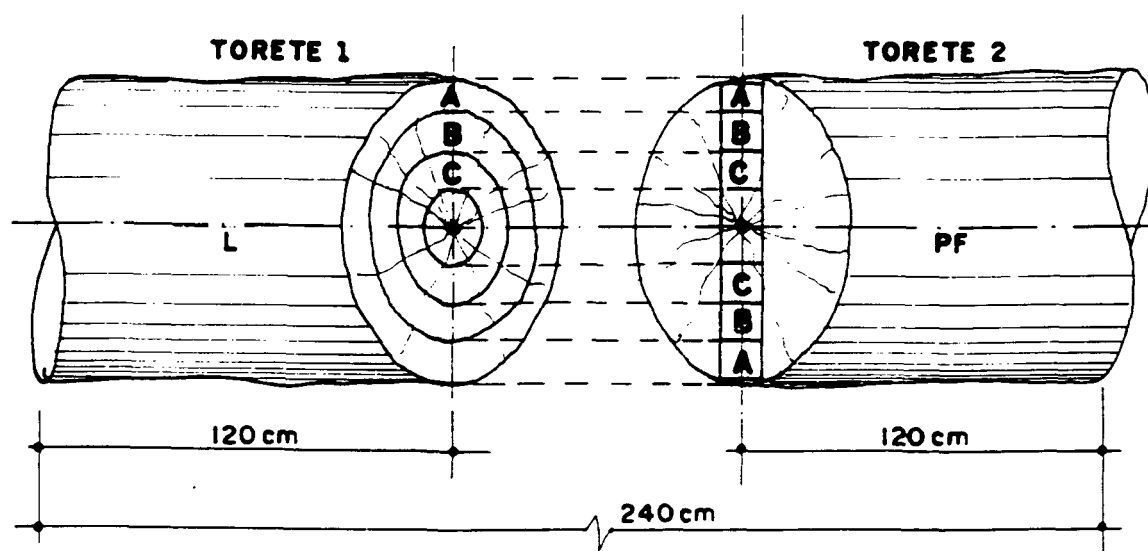


FIGURA 12- ESQUEMA DA CORRESPONDÊNCIA DO MATERIAL PARA O ESTUDO DAS PROPRIEDADES DA MADEIRA E AS LÂMINAS PARA CONFECÇÃO DOS COMPENSADOS.

3.4.2 Laminação

A toras foram descascadas logo antes da laminação. O equipamento utilizado na laminação, foi um torno automático de marca FEZER modelo 12-PA, com comprimento de laminação mínima de 120 cm e diâmetro mínimo das garras de arrasto de 12 cm. Laminou-se numa espessura nominal de 2 mm e o ajuste do torno foi efetuado segundo a experiência da indústria.

Na saída do torno, as lâminas foram enroladas em bobinas, agrupadas segundo a marcação prévia e logo transportadas à guilhotina onde definiu-se uma largura de 0,70m, ficando assim com uma dimensão nominal de 1,20m x 0,70m x 0,002m.

3.4.3 Secagem das lâminas

As lâminas foram secas num secador industrial contínuo de fluxo cruzado. A secagem efetuou-se a uma temperatura média de 130°C e com uma velocidade de passagem de 0,7 m/min. A umidade final das lâminas na saída do secador foi de 6 a 8% aproximadamente.

3.5 CONFECÇÃO DOS COMPENSADOS

As lâminas foram recortadas em dimensões de 600 x 600mm, superfície máxima admitida pela prensa piloto utilizada.

O teor de umidade das lâminas foi ajustado numa estufa de laboratório utilizando-se uma temperatura de 70°C, levando-se até uma umidade média de 4 a 6%, segundo os requerimentos dados pelo fornecedor de resina.

Os compensados foram feitos de 5 lâminas com dimensões nominais de 600mm x 600mm x 10mm.

As variáveis do processo de fabricação dos compensados, foram escolhidas levando-se em consideração as experiências para *Pinus* (KOCH, 1972) e no país por (MEDINA, 1986) bem como as recomendações do fabricante da resina utilizada. Assim, as variáveis foram fixas para todos os painéis como segue:

Temperatura de prensagem	130 °C
Tempo de prensagem	10 min
Tempo de junção	15 min
Pressão de prensagem	9 kg/cm ²
Quantidade de adesivo (linha dupla de colagem)	360 g/m ²
Teor de umidade das lâminas	4 a 6 %

A resina utilizada na elaboração do adesivo foi fenol-formol líquida. A fórmula foi a seguinte:

Formulação em partes por peso:

Resina	100
Casca de noz em pó	10

Finalmente os compensados foram climatizados a uma temperatura de 20 ± 2°C e umidade relativa de 65 ± 2% até os mesmos atingirem condições de equilíbrio higroscópicos, verificáveis pela sua massa constante.

3.6 AVALIAÇÃO DOS PAINÉIS

Na avaliação dos painéis, as determinações principais para o objetivo do estudo foram a resistência à flexão estática longitudinal e transversal e a massa específica dos compensados. Os testes efetuados e as normas empregadas, podem ser visualizados na Tabela 3.

TABELA 3- PROPRIEDADES MECÂNICAS E FÍSICAS ESTUDADAS, E ESPECIFICAÇÕES DAS NORMAS UTILIZADAS EM TESTES DE COMPENSADOS

TESTE	CONDIÇÕES	PROPRIEDADE DETERMINADA		NORMA
Flexão estática	Paralelo às fibras	Módulo de elasticidade	(kgf/cm ²)	DIN
		Módulo de ruptura	(kgf/cm ²)	
	Perpendicular às fibras	Módulo de elasticidade	(kgf/cm ²)	
		Módulo de ruptura	(kgf/cm ²)	
Massa específica	Massa e volume do corpo de prova acondicionado a 20±1°C 65±2% UR	Massa específica aparente a 12% de umidade (g/cm ³)		DIN

De cada torete foram feitos cinco compensados de cada grupo (A, B e C) de lâminas, perfazendo 30 em cada árvore e um total de 90 para cada espécie.

Para o teste de flexão estática foram retirados de cada chapa 10 corpos de prova como indicado na Figura 13, cinco para flexão paralela e cinco para flexão perpendicular às fibras, perfazendo um total de 900 amostras testadas por espécie.

Os corpos de prova, depois de confeccionados, foram colocados em câmara de aclimação (temperatura de $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ e umidade relativa de $65 \pm 2\%$) até estabilização da umidade.

Foi utilizada, para a execução dos testes, uma máquina de ensaio universal marca TINIUS OLSEN, com capacidade de carga de 30 toneladas. A escala utilizada foi de até 300 kg, que melhor adaptou-se aos testes de resistência do material.

Para o cálculo da massa específica foi retirada uma amostra perto da região da fratura do corpo de prova de flexão, perfazendo também um total de 900 amostras para cada espécie.

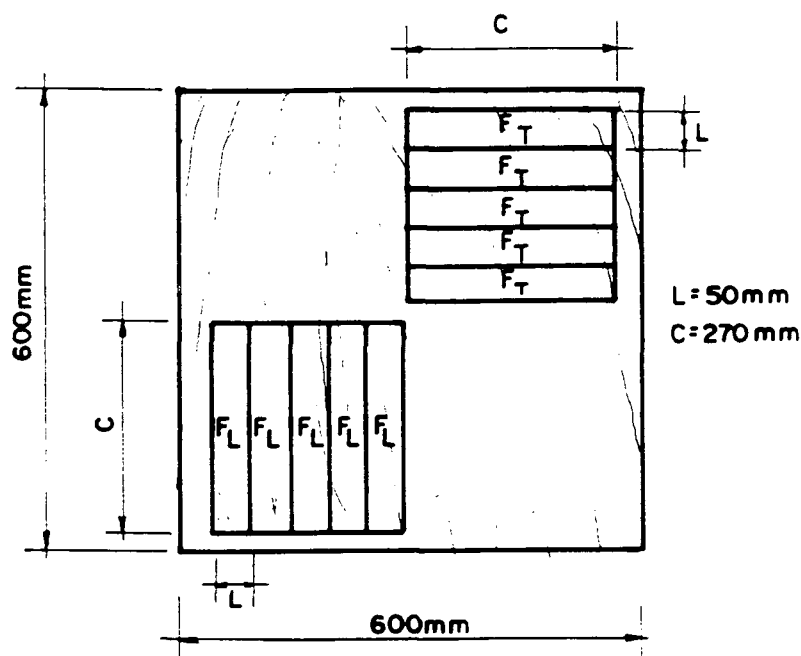


FIGURA 13- ESQUEMA DA FORMA DE RETIRADA DOS CORPOS DE PROVA DOS COMPENSADOS

3.7 ENSAIOS DE FLEXÃO ESTÁTICA

3.7.1 Flexão convencional

Os ensaios de flexão foram realizados com os corpos de prova bi-apoiados e com aplicação de carga concentrada F no meio do vão, conforme esquema ilustrado pela Figura 14. Antes de se iniciar o ensaio propriamente dito, foi aplicada uma carga de acomodação ao conjunto da ordem de 20% da carga de ruptura do corpo de prova, sem a preocupação de se fazer registro. Em seguida esta carga foi removida, sendo então iniciado efetivamente o primeiro carregamento. Foram registradas as curvas de carga-deformação até a ruptura do material.

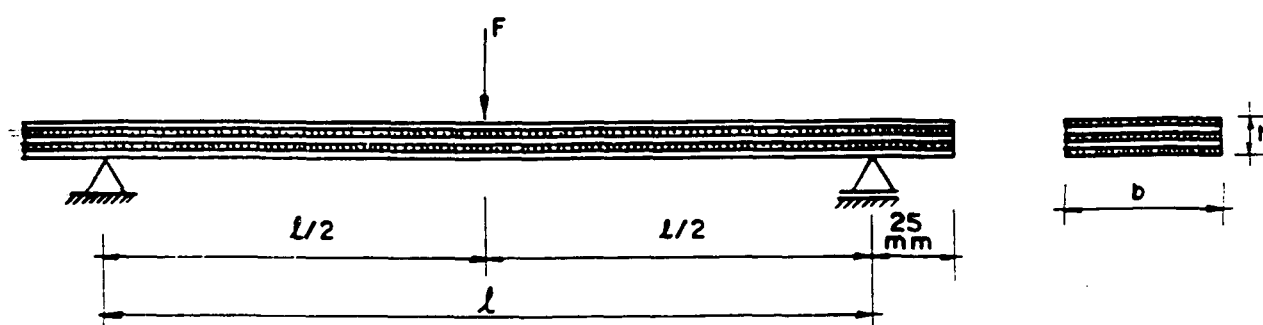


FIGURA 14 - ENSAIO DE FLEXÃO ESTÁTICA

Para efeito dos cálculos não foram considerados os três primeiros pares de valores de carga-deformação.

Os vãos adotados em função da espessura dos corpos de prova, de acordo com a metodologia da norma DIN-52371, são tais que a parcela da flecha no centro do vão, devido ao cisalhamento, pode ser desprezada. Da resistência dos materiais

tem-se a flecha para uma viga sobre dois apoios de material elástico-linear, isotrópico e homogêneo, submetido a uma carga concentrada no meio do vão:

$$d_{LP} = (P_{LP} \cdot L^3) / (48 \cdot E \cdot I)$$

Considerando-se a secção transversal composta de um único material e homogêneo, tem-se que o momento de inércia:

$$I = (b \cdot h^3) / 12$$

A estimativa do módulo de elasticidade efetivo é dado por:

$$E = (P_{LP} \cdot L^3) / (4 \cdot d_{LP} \cdot b \cdot h^3)$$

Foi calculada também a resistência convencional a flexão (MOR) pela seguinte fórmula:

$$MOR = 3(P \cdot L) / (2 \cdot b \cdot h^3)$$

3.7.2 Cálculo teórico dos módulos de elasticidade efetivos

3.7.2.1 Cálculo considerando toda a seção transversal (Método exato)

Foram determinados os valores dos módulos de elasticidade efetivos (E_{XT}) e (E_{YT}) dos compensados com base na equação geral (19). No caso particular de

compensados compostos de n lâminas da mesma espessura e da mesma espécie obtidas por corte rotatório, a equação (19) é expressa por:

$$\bar{E}_{XT} = \bar{E}_{YT} = \frac{r \cdot I_T + I_L}{I} \cdot E_L$$

sendo,

\bar{E}_{XT} = módulo de elasticidade efetivo paralelo às fibras

\bar{E}_{YT} = módulo de elasticidade efetivo perpendicular às fibras.

I_L = momento de inércia das lâminas paralelas ao vão, em relação a linha neutra da seção

I_T = momento de inércia das lâminas perpendiculares ao vão, em relação a linha neutra da seção

I = momento de inércia de toda a seção em relação ao eixo neutro

E_L = módulo de elasticidade longitudinal da madeira

r = E_T/E_L relação entre o módulo de elasticidade perpendicular na direção tangencial e longitudinal da madeira.

Considerando-se um compensado composto de 5 lâminas, o módulo de elasticidade efetivo fica determinado pela seguinte equação:

$$\bar{E}_{XT} = \frac{26r + 99}{125} \cdot E_L \quad \text{e} \quad \bar{E}_{YT} = \frac{26 + 99r}{125} \cdot E_L$$

Visando uma análise mais ampla no cálculo teórico dos parâmetros elásticos, foram determinados os módulos de elasticidade longitudinal (E_L) e tangencial (E_T) da madeira, considerando as seguintes relações:

- a) E_{Lc} obtido através de ensaios de compressão paralela à grã de madeira sem defeitos
 E_{Tc} obtido através de ensaios de compressão perpendicular à grã na direção tangencial
- b) E_{Lf} obtido através de ensaios de flexão estática em madeira sem defeitos
 E_{Tc} obtido através de ensaios de compressão perpendicular à grã na direção tangencial
- c) E_{Lf} Obtido através de ensaios de flexão estática em madeira sem defeitos
 $E_T = E_{Lf}/35$ relação recomendada por BODIG & JAYNE (1982) para lâminas de coníferas obtidas por desenrolamento
- d) E_{Lc} obtido através de ensaios de compressão paralela à grã em madeira sem defeitos
 $E_T = E_{Lc}/35$
- e) E_{Lf} Obtido através de ensaios de flexão estática em madeira sem defeitos
 E_T obtido da relação $0,045 \cdot E_{Lf}$ (HANSEN, 1962; FREAS, 1964 e FOREST PRODUCTS LABORATORY, 1987),
- f) E_{Lc} obtido através de ensaios de compressão paralela à grã em madeira sem defeitos
 E_T obtido da relação $0,045 \cdot E_{Lc}$
- g) E_{Lfl} obtido através de ensaios de flexão estática em lâminas de madeira.
 E_{Tc} obtido através de ensaios de compressão perpendicular à grã na direção tangencial

h) E_{Lfl} obtido através de ensaios de flexão estática em lâminas de madeira

E_T obtidos da relação $0,045 \cdot E_L$.

Os corpos de prova confeccionados a partir de lâminas de madeira, destinados a ensaios de flexão estática paralela às fibras (E_{Lfl}), foram retirados de duas lâminas, selecionadas ao acaso de um grupo de sete classificadas para a confecção de um compensado.

Das duas lâminas selecionadas foram feitos 40 corpos de prova, dos quais tomaram-se cinco ao acaso para o ensaio de flexão, perfazendo um total de 25 amostras em cada posição em estudo (A, B ou C) por torete, e um total de 450 para cada espécie.

Os corpos de prova, foram submetidos às condições de ambiente controlado, a $20 \pm 2^\circ\text{C}$ e $65 \pm 2\%$ de UR, até estabilização da umidade, quando então foram pesados para posterior determinação da massa específica e do teor de umidade.

Os corpos de prova tinham dimensões de 100 x 25 x 1,8mm, e a metodologia básica utilizada nos ensaios de flexão estática em lâminas está descrita em 3.7.1.

O equipamento utilizado para a execução dos testes foi a máquina de ensaio universal computadorizada de marca EMIC modelo MEM-500 pertencente ao Laboratório Mecânico da Indústria EQUITEL S.A. em Curitiba, com capacidade de carga de 0,01 a 0,50 toneladas, sendo que a escala utilizada foi de até 25 kg, a que melhor adaptou-se aos testes de flexão.

3.7.2.2 Cálculo teórico dos módulos de elasticidade efetivos, considerando apenas as lâminas com fibras paralelas ao vão

Foram também efetuadas determinações do módulo de elasticidade à flexão, considerando-se no cálculo, somente as lâminas com fibras paralelas ao vão. O módulo de elasticidade, com base na equação geral (19), para o caso particular deste estudo fica expresso por:

$$\bar{E}_{xp} = \bar{E}_{yp} = (I_L/I) \cdot E_L$$

Considerando-se os compensados feitos de 5 lâminas, o módulo de elasticidade fica determinado pelas seguintes equações:

$$\bar{E}_{xp} = 99/125 \cdot E_L \text{ e } \bar{E}_{yp} = 26/125 \cdot E_L$$

Os módulos de elasticidade longitudinal (E_L) utilizados no cálculo foram: E_{LC} , E_{Lf} e $E_{Lf\perp}$ como indicado no item 3.7.2.1.

3.7.3 Cálculo teórico da resistência máxima à flexão

Foram calculados os valores do módulo de ruptura (resistência máxima à flexão) dos compensados (Fr), com base nas equações (27) e (28). Assim, para o caso do compensado em estudo, composto de 5 lâminas de mesma espessura e mesma espécie de madeira, o módulo de ruptura paralelo ($Fr\parallel$) e perpendicular ($Fr\perp$) às fibras fica determinado pelas seguintes equações:

$$F_{rl} = \left[\frac{26 \cdot r + 99}{125} \right] \times F_M \quad ; \quad F_{rt} = \left[\frac{50 \cdot r + 26}{75} \right] \times F_M$$

O valor de r utilizado nos cálculos, foi obtido considerando as mesmas relações do item 3.7.2.1 (a, b, e e f), para determinar os módulos de elasticidade longitudinal (E_L) e perpendicular (E_T), e o módulo de ruptura (F_M) foi obtido através dos seguintes testes:

- a) F_{Mc} obtido através de ensaios de compressão paralela à grã em corpos de prova de madeira sem defeitos.
- b) F_{Mf} obtido através de ensaios de flexão estática em corpos de prova de madeira sem defeitos.
- c) F_{Mfl} obtido através de ensaios de flexão estática em lâminas de madeira.

Também foi calculado o módulo de ruptura à flexão, considerando-se somente as lâminas com fibras paralelas ao vão. Assim, com base nas equações acima, o módulo de ruptura fica determinado pelas seguintes expressões:

$$F_{rlp} = (99/125) \cdot F_M \quad ; \quad F_{rt} = (26/75) \cdot F_M$$

Os módulos de ruptura (F_M) utilizados nos cálculos, foram os mesmos considerados na determinação de F_{rl} e F_{rt} .

3.7.4 Cálculo teórico da tensão no limite proporcional

Foram calculados os valores da tensão no limite proporcional (F_{al}) e (F_{at}) dos compensados, com base nas equações (29) e (30). Para o caso deste estudo, onde n é igual a 5, as equações são expressas da seguinte forma:

$$F_{al} = \left[\frac{26 \cdot r + 99}{125} \right] \times F_L \quad ; \quad F_{at} = \left[\frac{50 \cdot r + 26}{75} \right] \times F_L$$

O valor r foi calculado, considerando as mesmas relações do item 3.7.2.1. (a, b, e e f), para a obtenção dos módulos de elasticidade E_L e E_T e o valor da tensão no limite proporcional (F_L) foi obtido dos seguintes testes:

- a) F_{Lf} calculado através de ensaios de flexão estática em madeira sem defeitos
- b) F_{Lc} calculado através de ensaios de compressão paralela à grã em madeira sem defeitos

Foi também calculada a tensão no limite proporcional nas duas direções principais, considerando-se somente as lâminas com fibras paralelas ao vão. Assim, o valor da tensão fica determinado pelas seguintes expressões:

$$F_{alp} = (99/125) \cdot F_L \quad ; \quad F_{atp} = (26/75) \cdot F_L$$

Os valores da tensão (F_L) utilizados nos cálculos foram os mesmos considerados na determinação de F_{al} e F_{at} .

3.8 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Na primeira parte da pesquisa, que corresponde às relações entre as propriedades da madeira e as propriedades dos compensados, utilizou-se delineamento totalmente casualizado. Foi feita análise de variância para ver se existiu diferença significativa entre os valores de médias dos tratamentos a 95% de probabilidade. Foram consideradas as posições (A, B e C) como tratamentos e as variáveis tomadas em cada torete como repetição.

A segunda parte do estudo, que corresponde à equivalência entre as propriedades elásticas e de resistência dos compensados, determinadas através de ensaios convencionais e calculados, utilizando-se equações teóricas de predição, foi também analisado através do delineamento experimental totalmente casualizado. Foram consideradas as propriedades de resistência e elasticidade como tratamento e 18 repetições (3 árvores, 2 toretes por árvore e 3 posições em relação ao diâmetro) em cada tratamento.

Com o objetivo de estabelecer relações entre as propriedades estudadas nos compensados foram feitas análises de regressão, utilizando os seguintes modelos de equações para o ajuste de curvas:

- | | |
|-------------------------------------|-------------------------|
| a) modelo linear simples | $(y=b_0+b_1x)$ |
| b) modelo linear com duas variáveis | $(y=b_0+b_1x_1+b_2x_2)$ |
| c) modelo polinomial de 2º grau | $(y=b_0+b_1x+b_2x^2)$ |

Foram testadas, como variáveis dependentes, o módulo de elasticidade, o módulo de ruptura e a tensão no limite proporcional do compensado, e como variáveis independentes os módulos de elasticidade, de ruptura e a massa específica.

O ajuste e a precisão das equações foram avaliados pelo coeficiente de determinação (R^2) e o erro padrão de estimativa (S_{yx}).

Além da análise de variância e de regressão, determinaram-se para todos os tratamentos os valores médios, desvio padrão e coeficientes de variação das diferentes propriedades medidas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 ANÁLISE ENTRE A MADEIRA E COMPENSADOS

4.1.1 Variação da massa específica da madeira sólida e das lâminas no sentido medula-casca

As Tabelas 4 e 5 apresentam as estatísticas médias, desvio padrão (s) e coeficiente de variação (C.V.) obtidos para os valores de massa específica aparente da madeira de ambas espécies, no sentido medula-casca das árvores (posições A, B e C).

Os dados de massa específica aparente foram analisados através do teste de Bartlett que confirmou a hipótese de nulidade, pelo qual não foi necessário efetuar a transformação da variável.

As análises de variância realizadas, conforme resumo apresentado (Anexos A2-1 e A2-2), mostraram que a tendência decrescente da massa específica nas duas espécies, em relação à posição (A, B e C) na árvore, é significativa ao nível de 5% de probabilidade.

Na comparação entre as médias da massa específica e para se observar a que nível da posição ocorreram as diferenças, foi verificado, com a aplicação do teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade (Anexo A2-9 e A2-10), que a análise de variância da massa específica entre posições A e B e A e C, para ambas espécies, mostrou significância estatística. Para o mesmo nível de probabilidade o teste mostrou também significância entre as posições B e C para *Pinus taeda* e nenhuma significância em *Pinus elliottii*.

TABELA 4- VALORES MÉDIOS DAS PROPRIEDADES DE RESISTÊNCIA E MASSA ESPECÍFICA PARA A MADEIRA *Pinus taeda*

PROPRIEDADE	Unidade	A			B			C		
		Média	S	C.V.	Média	S	C.V.	Média	S	C.V.
Massa específica	g/cm ³	0,596	0,031	5,22	0,524	0,050	9,66	0,449	0,034	7,50
Flexão estática										
MOE	kgf/cm ²	154308	22186	14,38	122309	26419	21,60	86771	19380	22,33
MOR	kgf/cm ²	951	132	13,86	762	111	14,57	593	120	20,30
TLP	kgf/cm ²	494	28	5,71	434	42	9,60	267	38	14,24
Compressão paralela à grã										
MOE	kgf/cm ²	166833	27641	16,57	126116	25345	20,10	85386	22615	26,49
MOR	kgf/cm ²	546	83	15,11	403	51	12,70	349	54	15,35
TLP	kgf/cm ²	338	82	24,17	260	31	11,88	216	53	24,66
Compressão perpendicular à grã (tangencial)										
MOE	kgf/cm ²	4098	1034	25,24	4780	1596	33,38	3677	447	12,16
TLP	kgf/cm ²	60,33	11,00	18,20	58,67	8,62	14,69	51,67	7,74	14,98

TABELA 5- VALORES MÉDIOS DAS PROPRIEDADES DE RESISTÊNCIA E MASSA ESPECÍFICA PARA A MADEIRA *Pinus elliottii*

PROPRIEDADE	Unidade	A			B			C		
		Média	S	C.V.	Média	S	C.V.	Média	S	C.V.
Massa específica	g/cm ³	0,545	0,034	6,22	0,439	0,039	8,89	0,401	0,010	2,57
Flexão estática										
MOE	kgf/cm ²	130579	19060	14,60	86141	12987	15,08	83491	18503	22,16
MOR	kgf/cm ²	829	69	8,28	586	94	16,11	554	96	17,40
TLP	kgf/cm ²	391	85	21,82	264	61	23,16	243	68	27,96
Compressão paralela à grã										
MOE	kgf/cm ²	123159	18557	15,07	84800	24291	28,65	56044	24190	43,16
MOR	kgf/cm ²	407	59	14,51	314	44	13,95	285	53	18,50
TLP	kgf/cm ²	260	49	18,96	179	26	14,25	158	39	24,83
Compressão perpendicular à grã (tangencial)										
MOE	kgf/cm ²	5006	1204	24,06	4460	957	21,00	4309	958	22,22
TLP	kgf/cm ²	64,17	4,31	6,72	57,67	10,33	17,91	55,83	12,40	22,21

De maneira geral, os valores médios da massa específica aparente, nas faixas de 0,449 g/cm³ a 0,596 g/cm³ (diferença de 24,70%), determinada para *Pinus taeda*, e de 0,401 g/cm³ a 0,545 g/cm³ (diferença de 26,40), determinada para *Pinus elliottii*, assemelham-se aos resultados apresentados na literatura para estas espécies por HAYASHIDA (1973), TOMASELLI (1980), LARA PALMA (1986), MEDINA (1986) e MUÑOZ (1993).

As diferenças entre a massa específica na direção medula-casca determinadas para as duas espécies, estão em concordância com a tendência observada por vários autores. PEARSON & GILMORE (1980), por exemplo, observaram diferenças de cerca de 23% a 15% entre as massas específicas de lenho interno e externo de *Pinus taeda* de 20 anos.

Em relação aos valores da massa específica aparente das lâminas de madeira, apresentados na Tabela 6, pode-se observar a mesma tendência decrescente, para as duas espécies, em relação às posições A, B e C. Os resultados das análise de variância (Anexos A2-7 e A2-8) mostraram este comportamento ao nível de 5% probabilidade.

Quando foram comparados os valores médios, com a aplicação do teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade (Anexo 2), para estabelecer em que posições ocorreram as diferenças, verificou-se que as diferenças entre as massas específicas nas posições A e B e A e C para as duas espécies, mostrou significância estatística, e não mostrou significância nas posições B e C, aceitando-se desta forma, a hipótese de igualdade entre as mesmas. Isto deve-se, provavelmente, ao fato de que os corpos de prova foram retirados de lâminas muito próximas entre as posições B e C, podendo pertencer a uma mesma faixa envolvente de madeira de mesma massa específica.

TABELA 6- VALORES MÉDIOS DAS PROPRIEDADES DE FLEXÃO ESTÁTICA DE LÂMINAS DE MADEIRA DE *Pinus taeda* (A) E *Pinus elliotti* (B)

(A)	Unidade	A			B			C		
PROPRIEDADE		Média	S	C.V.	Média	S	C.V.	Média	S	C.V.
Massa específica	g/cm ³	0,607	0,056	9,23	0,532	0,045	8,44	0,468	0,041	8,76
Flexão estática										
MOE	kgf/cm ²	81691	7533	9,22	69833	3986	5,71	61974	10714	17,29
MOR	kgf/cm ²	973	109	11,20	872	38	4,36	744	86	11,56

(B)	Unidade	A			B			C		
PROPRIEDADE		Média	S	C.V.	Média	S	C.V.	Média	S	C.V.
Massa específica	g/cm ³	0,550	0,034	6,22	0,460	0,047	10,20	0,419	0,044	10,39
Flexão estática										
MOE	kgf/cm ²	67338	18144	26,94	53091	17760	33,45	45353	13439	29,63
MOR	kgf/cm ²	849	129	15,19	690	131	18,93	614	139	22,67

A faixa de valores médios da massa específica aparente foi de 0,607 g/cm³ a 0,468 g/cm³ (diferença de 22,90%) para *Pinus taeda* e de 0,550 g/cm³ a 0,419 g/cm³ (diferença de 23,82) para *Pinus elliottii*.

De uma maneira geral, os valores médios da massa específica das lâminas para cada posição A, B e C estudada, em ambas espécies, são aproximadamente iguais aos valores médios obtidos na madeira sólida, resultando esta diferença ser maior nas lâminas em 3% no máximo.

4.1.2 Variação da massa específica aparente nos compensados

As Tabelas 7 e 8 apresentam os valores médios da massa específica aparente dos compensados confeccionados de lâminas provenientes das três posições (A, B e C) estudadas, para ambas espécies.

As análises de variância realizadas, conforme resumo apresentado (Anexo A2-3, A2-4, A2-5 e A2-6), mostraram que a tendência decrescente da massa específica aparente nos compensados, para as duas espécies, em relação ao sentido medula-casca (A, B e C) na árvore, é significativa ao nível de 5% de probabilidade.

Na comparação entre as médias da massa específica, para observar as diferenças entre as posições, foi verificado, com a aplicação do teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade, que as diferenças entre as massas específicas nas posições A e B e A e C, mostrou significância estatística para os compensados de *Pinus taeda* e, no caso dos compensados de *Pinus elliottii*, houve significância também nas posições B e C.

Neste estudo, observa-se que os valores médios da massa específica dos compensados, nas duas espécies, tiveram a mesma tendência crescente, no sentido medula-casca, que a madeira sólida e as lâminas, mas de maior valor.

TABELA 7- VALORES MÉDIOS DA MASSA ESPECÍFICA E DE FLEXÃO ESTÁTICA PARALELA (A) E PERPENDICULAR (B) ÀS FIBRAS DE COMPENSADOS DE *Pinus taeda*

(A) PROPRIEDADE	Unidade	A			B			C		
		Média	S	C.V.	Média	S	C.V.	Média	S	C.V.
Massa específica	g/cm ³	0,652	0,034	5,22	0,599	0,036	6,04	0,560	0,028	5,06
Flexão estática paralela às fibras										
MOE	kgf/cm ²	97273	15542	15,98	74857	7752	10,36	67454	9666	14,33
MOR	kgf/cm ²	702	95	13,60	595	59	9,97	557	46	8,32
TLP	kgf/cm ²	571	86	14,99	482	17	3,61	435	34	7,88
(B) PROPRIEDADE	Unidade	A			B			C		
		Média	S	C.V.	Média	S	C.V.	Média	S	C.V.
Massa específica	g/cm ³	0,666	0,042	6,24	0,596	0,035	5,87	0,559	0,035	6,31
Flexão estática perpendicular às fibras										
MOE	kgf/cm ²	31239	3081	9,86	25411	1462	5,75	21149	2484	11,75
MOR	kgf/cm ²	395	38	9,62	342	34	9,91	295	38	12,99
TLP	kgf/cm ²	284	22	7,64	245	23	9,50	214	19	8,80

TABELA 8- VALORES MÉDIOS DA MASSA ESPECÍFICA E DE FLEXÃO ESTÁTICA PARALELA (A) E PERPENDICULAR (B) ÀS FIBRAS DE COMPENSADOS DE *Pinus elliottii*

(A) PROPRIEDADE	Unidade	A			B			C		
		Média	S	C.V.	Média	S	C.V.	Média	S	C.V.
Massa específica	g/cm ³	0,627	0,036	5,78	0,544	0,023	4,25	0,495	0,022	4,50
Flexão estática paralela às fibras										
MOE	kgf/cm ²	80831	22115	27,36	65652	17473	26,61	49320	12740	25,83
MOR	kgf/cm ²	694	113	16,27	582	92	15,86	463	55	11,80
TLP	kgf/cm ²	499	91	18,20	416	77	18,57	322	51	15,92
(B) PROPRIEDADE	Unidade	A			B			C		
		Média	S	C.V.	Média	S	C.V.	Média	S	C.V.
Massa específica	g/cm ³	0,620	0,026	4,11	0,560	0,053	9,41	0,487	0,016	3,31
Flexão estática perpendicular às fibras										
MOE	kgf/cm ²	26642	5933	22,27	20838	4609	22,12	17111	3859	22,55
MOR	kgf/cm ²	354	48	13,70	289	46	15,83	233	32	13,83
TLP	kgf/cm ²	221	45	20,55	172	28	16,30	136	23	17,11

Em geral , a massa específica de um compensado depende da espécie, da predominância de lenho outonal que apresentam as lâminas, da umidade, pressão e temperatura usadas na fabricação. Para a faixa de pressões de 7 kg/cm² a 21 kg/cm², normalmente usadas na indústria, ocorre uma retração de aproximadamente 5% a 10% para um teor de umidade de lâminas de até 10%, ocasionando uma redução do volume por esmagamento, principalmente do lenho primavera e um leve aumento da massa específica do produto comprimido. Sendo assim, a massa específica de um compensado é um pouco maior do que da madeira sólida (KOLLMANN et al., 1975 e WELLONS et al., 1983 e BIER, 1983 b).

Comparando os resultados da massa específica dos compensados, aos valores médios da massa específica aparente da madeira sólida e lâminas, indicados na Tabela 9, observa-se este comportamento, sendo que a variação encontrada nos

compensados pode ser atribuída também à influência da massa específica que apresenta a própria madeira no sentido medula-casca.

TABELA 9- VALORES MÉDIOS DE MASSA ESPECÍFICA DA MADEIRA SÓLIDA, LÂMINAS E COMPENSADOS DE *Pinus taeda* E *Pinus elliottii*, E VARIAÇÃO ENTRE AS POSIÇÕES EM PORCENTAGEM

PRODUTO	Massa específica aparente (g/cm ³)			Variação entre posições (%)			
	Posição	ESPÉCIE		<i>P. taeda</i>		<i>P. elliottii</i>	
		<i>P. taeda</i>	<i>P. elliottii</i>	AB	AC	AB	AC
Madeira sólida	A	0,596	0,545				
	B	0,524	0,439	12,01	24,66	19,45	26,42
	C	0,449	0,401				
Lâminas	A	0,607	0,550				
	B	0,532	0,460	12,36	22,90	16,36	23,82
	C	0,468	0,419				
Compensado (direção paralela)	A	0,652	0,627				
	B	0,599	0,544	8,13	14,11	13,24	21,05
	C	0,560	0,495				
Compensado (direção perpendicular)	A	0,660	0,620				
	B	0,596	0,560	10,51	16,07	9,68	21,45
	C	0,559	0,487				

Os valores médios da massa específica aparente dos compensados variaram neste estudo de 0,559 g/cm³ a 0,660 g/cm³ para *Pinus taeda* e de 0,487 g/cm³ a 0,627 g/cm³ em *Pinus elliottii*, sendo a média da espécie semelhante aos resultados encontrados em compensados destas espécies por outros autores (HAYASHIDA, 1972; MEDINA, 1986 e LARA PALMA, 1986).

4.1.3 Variação das propriedades mecânicas no sentido medula-casca

Para observar a influência da madeira sólida nos compensados, foi analisado o comportamento das propriedades de resistência à flexão estática MOE- módulo de elasticidade, MOR - módulo de ruptura e TLP-tensão no limite

proporcional dos compensados, madeira e lâminas, nas mesmas posições A, B e C no sentido medula-casca, como feito para a massa específica.

As Tabelas 4 a 8 apresentam o valor médio, desvio padrão (s) e coeficiente de variação (C.V.) obtidos nos ensaios mecânicos de flexão estática, para as duas espécies estudadas, no sentido medula-casca da árvore (A, B e C).

As análises de variância (ver Anexo 2), mostraram que a tendência crescente das propriedades mecânicas dos compensados, da madeira e das lâminas em ambas espécies, no sentido medula-casca na árvore, é significativa ao nível de 5% de probabilidade.

Para observar em que posições ocorrem as diferenças aplicou-se o teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade (Anexo 2). As significâncias estatísticas encontradas são apresentadas na Tabela 10.

TABELA 10- RESUMO DAS SIGNIFICÂNCIAS ESTATÍSTICAS DO TESTE DE TUKEY EFETUADO PARA AS MÉDIAS DAS TRÊS POSIÇÕES A, B e C

Propriedade	<i>Pinus taeda</i>	<i>Pinus elliottii</i>
MOE- Madeira sólida	AC e BC	AB e AC
MOE- Compensado/paralelo	AB e AC	AB, AC e BC
MOE- Compensado/perpendicular	AC	AC
MOE- Lâminas	AB e AC	-
MOR- Madeira sólida	AB e AC	AB e AC
MOR- Compensado/paralelo	AB e AC	AB, AC e BC
MOR- Compensado/perpendicular	AB e AC	AB e AC
MOR- Lâminas	AB e AC	AC
TLP- Madeira sólida	AB, AC e BC	AB e AC
TLP- Compensado/paralelo	AB e AC	AC
TLP- Compensado/perpendicular	AB e AC	AC

Observa-se que, na comparação dos valores médios de resistência à flexão estática, para as duas espécies, de uma maneira geral, existe a tendência semelhante - de aumentar no sentido medula-casca - à apresentada pela massa específica aparente.

Os valores médios de resistência à flexão estática variaram na faixa de 154308 kgf/cm² a 86771 kgf/cm² (diferença de 43,77%) para o MOE, de 951 kgf/cm² a 593 kgf/cm² (diferença de 31,64%) para o MOR e de 494 kgf/cm² a 267 kgf/cm² para TLP (diferença de 45,95%), para *Pinus taeda*. Para *Pinus elliottii* variaram de 130579 kgf/cm² a 83491 kgf/cm² para o MOE (diferença de 36,06%), de 829 kgf/cm² a 554 kgf/cm² para o MOR (diferença de 33,17%) e de 391 kgf/cm² a 243 kgf/cm² para a TLP.

Na Figura 15 e na Tabela 11 são apresentados os modelos de regressões simples ajustadas para estimar o módulo de elasticidade, o módulo de ruptura e a tensão no limite proporcional em função da massa específica para a madeira, lâminas e compensados.

Todos os modelos apresentaram valores significativos, ou seja, com apenas 5% de probabilidade de não acontecer a regressão. Para determinar a confiabilidade de R², foi feito o teste *t* ao nível de 5% de probabilidade, para todos os modelos, resultando em todos os casos significativo, ou seja, os dados ficam ajustados pela reta.

Com base nas correlações obtidas através das regressões lineares, entre MOE, MOR e TLP com a massa específica da madeira sólida, observou-se coeficientes de correlação (*r*) de 0,737 para MOE, 0,758 para MOR e 0,698 para TLP no caso de *Pinus taeda* e de 0,696 para MOE, 0,711 para MOR e 0,616 para TLP para *Pinus elliottii*.

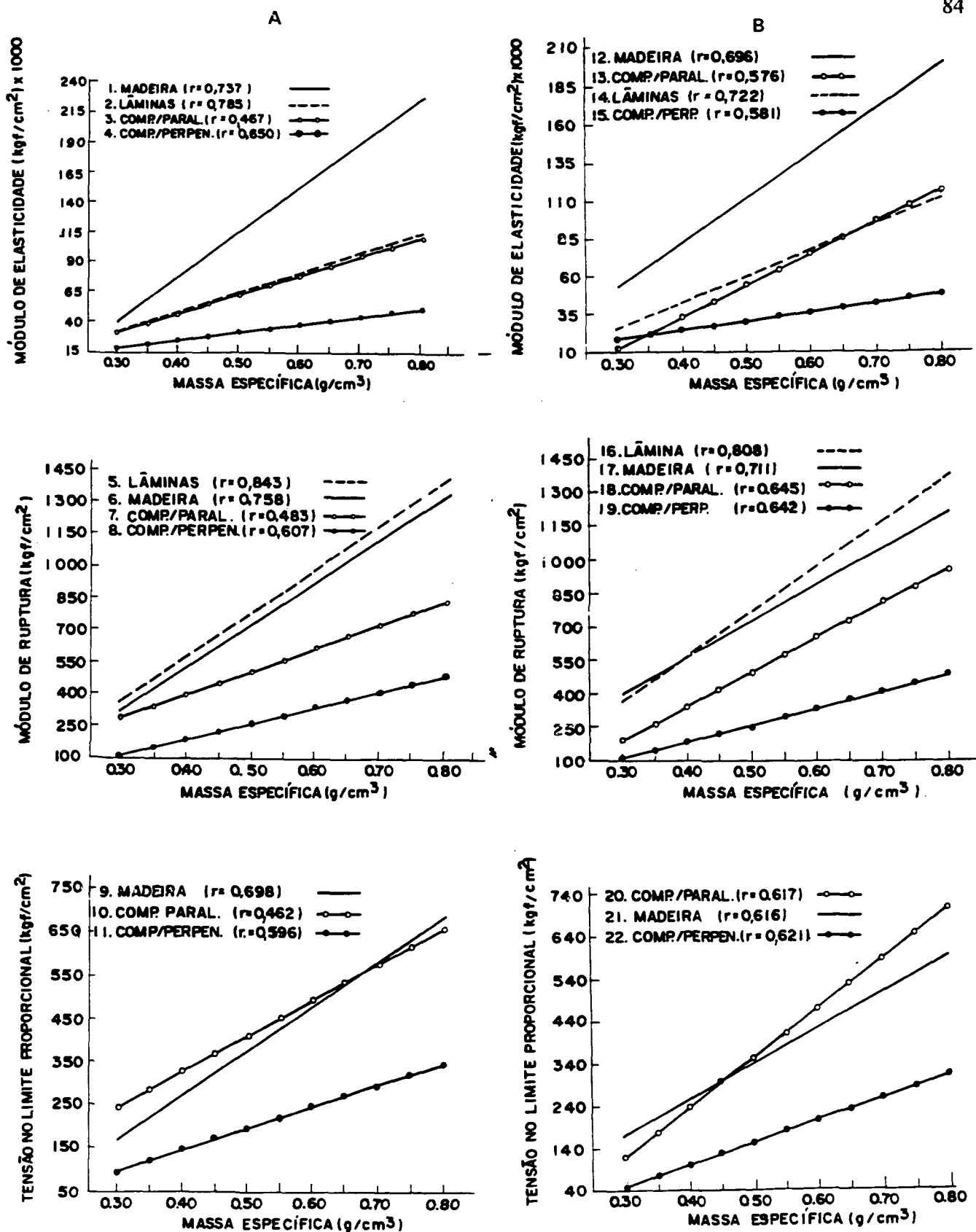


FIGURA 15- REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DAS EQUAÇÕES DE REGRESSÃO SIMPLES, AJUSTADAS PARA O MÓDULO DE ELASTICIDADE, MÓDULO DE RUPTURA, TENSÃO NO LIMITE PROPORCIONAL E MASSA ESPECÍFICA PARA *Pinus taeda* (A) E *Pinus elliottii* (B)

TABELA 11- EQUAÇÕES DE REGRESSÃO LINEAR DO MÓDULO DE ELASTICIDADE (MOE), MÓDULO DE RUPTURA (MOR) E A TENSÃO NO LIMITE PROPORCIONAL (TLP) EM FUNÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA PARA MADEIRA SÓLIDA, COMPENSADOS E LÂMINAS DE *Pinus taeda* e *Pinus elliottii*.

<i>Pinus taeda</i>	Modelo e Coeficientes	R ²	Equação
Madeira	MOE= 374812,50 Mem - 71461	0,543	(1)
Lâmina	MOE= 166851,20 Mel - 18372,40	0,616	(2)
Compensado/paralelo	MOE= 64554,48 Mec - 13256,79	0,218	(3)
Compensado/perpendicular	MOE= 159649,36 Mec - 16549,06	0,423	(4)
Lâmina	MOR= 21000,11 Mel - 262,78	0,711	(5)
Madeira	MOR= 2026,84 Mem - 282,63	0,574	(6)
Compensado/paralelo	MOR= 1100,78 Mec - 41,87	0,233	(7)
Compensado/perpendicular	MOR= 753,92 Mec - 113,63	0,368	(8)
Madeira	TLP= 1049,44 Mem - 146,85	0,488	(9)
Compensado/paralelo	TLP= 832,38 Mec - 6,64	0,213	(10)
Compensado/perpendicular	TLP= 499,66 Mec - 55,40	0,355	(11)
<i>Pinus elliottii</i>			
Madeira	MOE= 296367,50 Mem - 36209,50	0,484	(12)
Compensado/paralelo	MOE= 212560,40 Mec - 52780,40	0,332	(13)
Lâmina	MOE= 174026,00 Mel - 27144,30	0,522	(14)
Compensado/perpendicular	MOE= 60135,17 Mec - 11668,80	0,337	(15)
Lâmina	MOR= 2019,64 Mel - 240,44	0,652	(16)
Madeira	MOR= 1635,36 Mem - 94,96	0,505	(17)
Compensado/paralelo	MOR= 1545,56 Mec - 279,31	0,416	(18)
Compensado/perpendicular	MOR= 765,91 Mec - 129,79	0,412	(19)
Compensado/paralelo	TLP= 1150,41 Mec - 226,18	0,381	(20)
Madeira	TLP= 505,60 Mem - 102,42	0,379	(21)
Compensado/perpendicular	TLP= 820,38 Mec - 74,61	0,385	(22)

Mem = massa específica da madeira sólida (g/cm³)
 Mel = massa específica das lâminas (g/cm³)
 Mec = massa específica do compensado (g/cm³)
 MOE= módulo de elasticidade (kgf/cm²)
 MOR= módulo de ruptura (kgf/cm²)
 TLP = tensão no limite de proporcionalidade (kgf/cm²)

As correlações lineares entre as propriedades de resistência à flexão estática, na variação medula-casca para a madeira sólida, nas duas espécies, apresentam a mesma tendência observada por vários pesquisadores que obtiveram

boas correlações lineares entre as propriedades de resistência e massa específica. BENDTSEN & ETHINGTON e MANWILLER, citados por KOCH (1972), observaram correlação linear positiva entre os módulos de ruptura e de elasticidade com a massa específica em cinco espécies do gênero *Pinus*, variando os coeficientes de correlação (r) de 0,72 a 0,87. PEARSON & GILMORE (1980) obtiveram correlações mais estreitas entre o módulo de ruptura e a massa específica ($r = 0,89$), e entre o módulo de elasticidade e massa específica ($r = 0,81$), para *Pinus taeda*.

Da mesma forma, como observado para as propriedades de resistência à flexão estática na madeira sólida, os valores médios de resistência à flexão, obtidos para as lâminas de madeira no sentido medula-casca das duas espécies, acompanham a tendência observada na massa específica aparente. Na Figura 15 observa-se a correlação da resistência à flexão estática com a massa específica aparente para as duas espécies.

Observa-se que, na comparação dos valores médios de resistência à flexão estática, para as espécies, de maneira geral, existe tendência semelhante - de aumentar no sentido medula-casca - à apresentada pelos valores médios das propriedades de resistência na madeira sólida.

Os valores médios de resistência à flexão estática nas lâminas variaram de 81691 kgf/cm² a 61974 kgf/cm² (diferença de 24,14%) para o MOE e 973 kgf/cm² a 744 kgf/cm² (diferença de 23,54%) para o MOR para o *Pinus taeda*, e de 67338 kgf/cm² a 45353 kgf/cm² no MOE (diferença de 32,65%) e 849 kgf/cm² no MOR (diferença de 27,68%) para *Pinus elliottii*, valores que em média, são inferiores àqueles da madeira sólida em aproximadamente 41,25% e 44,77% para o MOE em *Pinus taeda* e *Pinus elliottii* e maiores para o MOR em 10,89% e 8,64% nas duas espécies.

Com base nas correlações obtidas das regressões lineares em função da massa específica, observaram-se coeficientes de correlação (r) de 0,785 para MOE

e 0,843 para o MOR, no caso de *Pinus taeda* e de 0,722 para MOE e 0,808 para MOR para *Pinus elliottii*.

Para os valores médios da resistência à flexão estática dos compensados, observou-se também, nas duas espécies estudadas, que existe a mesma tendência de aumentar no sentido da medula-casca, como observado, na madeira sólida e nas lâminas.

Com base nos resultados das correlações obtidas das regressões lineares em função da massa específica, os coeficientes de correlações (r) foram de 0,467 para o MOE e 0,483 para o MOR e de 0,462 para TLP no sentido paralelo às fibras e de 0,650 para o MOE, 0,607 para o MOR e de 0,596 para TLP no sentido perpendicular às fibras para *Pinus taeda*, e de 0,576, 0,645 e 0,617 para o MOE, MOR e TLP no sentido paralelo e de 0,581, 0,642 e 0,621 para MOE, MOR e TLP no sentido perpendicular às fibras em *Pinus elliottii*.

As correlações lineares positivas, observadas entre as propriedades de resistência à flexão estática e a massa específica nos compensados, são as normais, quando é considerado somente o efeito da massa específica como variável independente nas equações (BIER, 1984).

Observa-se nas equações de regressão, de uma forma geral, para as duas espécies, que um aumento na massa específica do painel conduz a um aumento nas propriedades de resistência à flexão estática. Este comportamento foi também registrado por BIER (1983/84) em compensados de *Pinus radiata* com coeficientes de correlação (r) de 0,570 para MOE e 0,500 para MOR no sentido paralelo às fibras e de 0,627 para MOE e 0,647 para MOR no sentido perpendicular às fibras.

Observando os valores médios do módulo de elasticidade, de ruptura e da tensão no limite proporcional obtidos dos compensados, em ambas espécies, evidenciou-se uma diferença entre estas propriedades no sentido paralelo e perpendicular às fibras. Este comportamento é normal, principalmente em

compensados confeccionados com poucas camadas, uma vez que poucas lâminas contribuirão na resistência à flexão no sentido perpendicular ao vão. As camadas com as fibras perpendiculares ao vão, praticamente não contribuem nas propriedades de resistência e rigidez do compensado, pois seus valores nesses sentidos são aproximadamente 4% a 8% de aquele no sentido paralelo. Para o caso do teste perpendicular às fibras num compensado de 5 lâminas somente duas contribuem na resistência à flexão (SUCHSLAND, 1972; KOLLMANN *et al.*, 1975 e BODIG & JAYNE, 1982).

Assim, quanto maior é o número de camadas, maior é a equalização da resistência e rigidez nas duas direções, devido a uma melhor distribuição de cargas através do painel (KEINERT, 1984).

Comparados os resultados médios com os valores mínimos exigidos por normas e aos obtidos por outros autores para compensados elaborados com espécies de *Pinus*, indicados na Tabela 12, observa-se que o módulo de ruptura no sentido paralelo e perpendicular às fibras está dentro da norma DIN nas duas espécies, e o módulo de elasticidade no sentido paralelo nas duas espécies, está dentro da norma brasileira de controle e classificação de compensados de 1985, que fixa para compensados classificados como forma de concreto, no mínimo o valor de 40787 kgf/cm². Quando comparado o valor médio obtido das três posições (A, B e C) aos valores apresentados por outros autores, observa-se que, somente os valores médios do MOE e MOR no sentido paralelo são semelhantes.

TABELA 12- COMPARAÇÃO DOS VALORES DE RESISTÊNCIA À FLEXÃO ESTÁTICA OBTIDOS NESTA PESQUISA, COM ALGUNS VALORES ENCONTRADOS NA LITERATURA

Norma e Espécie	Flexão paralela (kgf/cm ²)		Flexão perpendicular (kgf/cm ²)		Observações
	MOR	MOE	MOR	MOE	
DIN-68705	408	-	153	-	-Valores mínimo exigidos para compensados de construção
Norma Brasileira (1985)	-	40787	-	40787	-Valores mínimos exigidos para compensados de formas de concreto
<i>Pinus strobus chiapensis</i>	400	-	-	-	-Compensado com 15mm de espessura composto por 5 lâminas (JANKOWSKY, 1978)
<i>Pinus elliottii</i>	700	91140	564	74000	-Compensado com 8 mm de espessura composto por 5 lâminas (HAYASHIDA, 1972)
<i>Araucária angustifolia</i>	551	95700	497	46300	-Compensados com 12 mm de espessura composto por 5 lâminas (IPT, 1972)
<i>Pinus taeda</i>	618	79861	344	25933	-Compensados com 10 mm de espessura composto por 5 lâminas (dados do trabalho da tese)
<i>Pinus elliottii</i>	580	65268	292	21530	-Compensados com 10 mm de espessura composto por 5 lâminas (dados do trabalho da tese)

Os valores médios de resistência à flexão paralela nos compensados variaram entre 67454 kgf/cm² e 97273 kgf/cm² para o MOE no caso de *Pinus taeda* e de 49320 kgf/cm² e 80831 kgf/cm² para *Pinus elliottii*, valores semelhantes aos encontrados por LARA PALMA (1986) e MEDINA (1986). No caso do módulo de ruptura no sentido paralelo às fibras os valores variaram entre 557 kgf/cm² e 702 kgf/cm² para *Pinus taeda* e de 463 kgf/cm² a 694 kgf/cm² para *Pinus elliottii*.

Estes valores quando comparados aos valores médios encontrados na madeira sólida, mostram uma diminuição de 20% na resistência, e de 34% na rigidez para o caso de *Pinus taeda* e de 11,6% na resistência e 34,2% na rigidez

para *Pinus elliottii*. Esta é uma característica dos produtos compensados, que têm uma redução na resistência máxima da madeira e um aumento na resistência mínima (KEINERT, 1984).

4.1.4 Modelos para estimar as propriedades dos compensados

Para se estimar as propriedades dos compensados em função das propriedades da madeira, foram pesquisadas várias relações envolvendo as propriedades das lâminas no sentido longitudinal, e dos compensados no sentido paralelo às fibras.

Foram consideradas as propriedades das lâminas nas relações, devido à semelhança encontrada entre a massa específica destas com a madeira sólida, e à maior correspondência entre os corpos de provas, de acordo com a amostragem.

A Tabela 13 apresenta o resumo dos modelos encontrados para estimar as propriedades dos compensados de ambas as espécies, no sentido paralelo às fibras.

Com relação ao comportamento dos dados nas equações 1,2,5 e 6, observa-se que as propriedades mecânicas das lâminas (MOR e MOE) não se constituem em um estimador aceitável do MOR e MOE dos compensados.

De uma maneira geral, pode-se observar das equações 4 e 7 e da Figura 16, que a massa específica das lâminas apresentou-se como um estimador um pouco melhor da massa específica dos compensados. Apesar da dispersão dos valores, nota-se que um aumento da massa específica das lâminas implica em um aumento da massa específica do painel.

TABELA 13- RESULTADOS DAS ANÁLISES DE REGRESSÃO ENTRE AS PROPRIEDADES DOS COMPENSADOS E DAS LÂMINAS

	Modelo e Coeficientes	R ²	Equação
<i>Pinus taeda</i>	MOEc = 37061,09 + 0,603 MOEI	0,258	(1)
	MORc = 412,19 + 0,245 MORI	0,149	(2)
	Mec = 0,386 + 0,407 Mel	0,438	(3)
	Mec = 0,525 - 0,126 Mel + 0,498 Mel ²	0,450	(4)
<i>Pinus elliottii</i>	MOEc = 27082,25 + 0,713 MOEI	0,415	(5)
	MORc = 296,47 + 0,408 MORI	0,339	(6)
	Mec = 0,344 + 0,462 Mel	0,421	(7)

MOEc = módulo de elasticidade do compensado

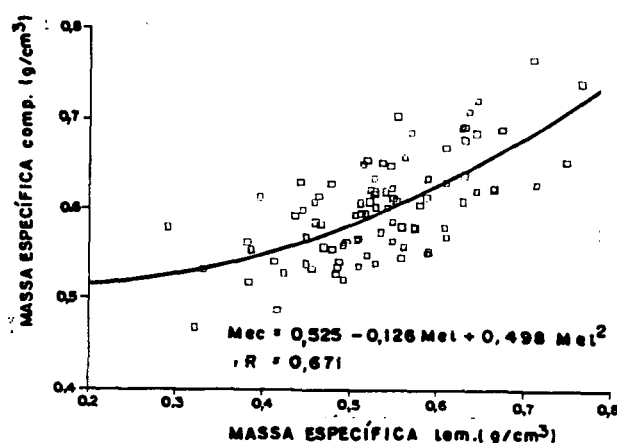
MOEI = módulo de elasticidade da lâmina

MORc = módulo de ruptura do compensado

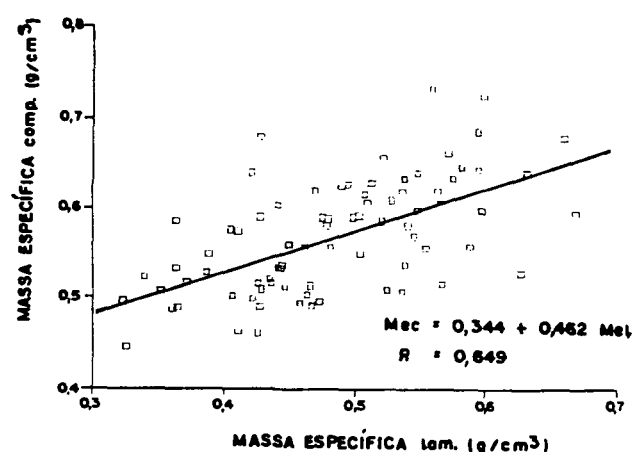
MORI = módulo de ruptura da lâmina

Mec = massa específica do compensado

Mel = massa específica da lâmina.



A



B

FIGURA 16. REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DAS EQUAÇÕES DE REGRESSÃO AJUSTADAS PARA A MASSA ESPECÍFICA DOS COMPENSADOS E A MASSA ESPECÍFICA DAS LÂMINAS PARA *Pinus taeda* (A) E *Pinus elliottii* (B)

4.2 EQUIVALÊNCIA ENTRE AS PROPRIEDADES ELÁSTICAS E DE RESISTÊNCIA DOS COMPENSADOS DETERMINADAS ATRAVÉS DE ENSAIOS DE FLEXÃO ESTÁTICA CONVENCIONAIS E EQUAÇÕES TEÓRICAS

4.2.1 Relações e cálculo das propriedades mecânicas da madeira sólida e das lâminas

Para comparar os valores teóricos das propriedades mecânicas de flexão estática dos compensados aos valores observados do teste de flexão convencional, foi necessário determinar as propriedades de resistência a flexão estática e a compressão da madeira sólida.

Os resultados obtidos nos ensaios de flexão estática na madeira sólida de *Pinus taeda* e *Pinus elliottii*, são apresentadas nas Tabelas 14 e 15, nas formas de módulo de elasticidade (E_{Lf}), módulo de ruptura (F_{Mf}) e tensão no limite proporcional (F_{Lf}), e os resultados obtidos dos testes de compressão, apresentam-se na forma de módulo de elasticidade paralelo (E_{Lc}), módulo de elasticidade perpendicular às fibras na direção tangencial (E_T), módulo de ruptura paralelo (F_{Mc}) e tensão no limite proporcional paralela (F_{Lc}).

As Tabelas 14 e 15 apresentam também os valores médios obtidos no teste de flexão estática em lâminas para as duas variáveis de resposta, módulo de elasticidade (E_{Lfl}) e módulo de ruptura (F_{Mfl}), realizado no sentido longitudinal às fibras.

Observa-se que, as relações entre o módulo de elasticidade perpendicular na direção tangencial e o módulo de elasticidade na direção longitudinal é igual a 0,033 para E_T/E_{Lc} e 0,035 para E_T/E_{Lf} no caso de *Pinus taeda* e de 0,053 e 0,046 para *Pinus elliottii*, valores semelhantes aos apresentados por FREAS (1964) e FOREST PRODUCTS LABORATORY (1987).

TABELA 14- VALORES DOS MÓDULO DE ELASTICIDADE, MÓDULO DE RUPTURA E TENSÃO NO LIMITE PROPORCIONAL DA MADEIRA SÓLIDA E LÂMINAS DE *Pinus taeda* OBTIDOS NO TESTE DE FLEXÃO ESTATICA E COMPRESSÃO, E RELAÇÕES ENTRE O MÓDULO DE ELASTICIDADE LONGITUDINAL - E_L E TANGENCIAL - E_T (EM kgf/cm^2)

Repetição	MADEIRA SÓLIDA							LÂMINAS		MÓDULO DE RUPTURA (kgf / cm ²)			TEN. LIM. PROP. (kgf / cm ²)		
	Compressão (kgf / cm ²)				Flexão estática (kgf / cm ²)			Flexão estática (kgf / cm ²)		Compres. paralela madeira	Flexão estática madeira	Flexão estática lâminas	Flexão estática madeira	Compres paralela madeira	
	Paralela	Perpendicular													
		E _{Lc}	E _T	E _T	E _T	E _{Lf}	E _T	E _T	E _{Lfl}	E _T	F _{Mc}	F _{Mf}	F _{Mfl}	F _{Lf}	FLc
			0,045 E _{Lc}	E _{Lc} / 35		0,045 E _{Lf}	E _{Lf} / 35		0,045E _{Lfl}						
T11A	167875	5628	7554	4796	177551	7990	5073	90504	4073	608	1159	1144	510	407	
T11B	94118	7394	4235	2689	86382	3887	2468	64881	2920	446	719	489	427	306	
T11C	75156	4142	3392	2147	78706	3542	2249	59060	2658	329	575	786	210	222	
T12A	144578	5015	6506	4131	174742	7863	4993	89957	4048	512	1036	1056	553	310	
T12B	168418	5758	7579	4812	160943	7242	4598	72184	3248	421	968	865	474	229	
T12C	72054	3593	3242	2059	107039	4817	3058	62948	2833	430	799	787	321	297	
T21A	138374	3212	6227	3954	134588	6056	3845	74184	3338	484	834	942	450	304	
T21B	138953	2845	6253	3970	128234	5771	3664	72244	3251	354	752	871	402	283	
T21C	123374	3700	5552	3525	110460	4971	3156	68547	3085	358	629	805	288	219	
T22A	160788	4104	7235	4594	127930	5757	3655	74000	3330	486	802	847	478	301	
T22B	123777	3800	5570	3536	121410	5463	3469	72246	3251	334	683	839	379	227	
T22C	83776	3300	3770	2394	89597	4032	2560	61288	2758	291	579	666	250	180	
T41A	216198	3593	9729	6177	169937	7647	4855	77552	3490	686	947	953	496	467	
T41B	113284	4382	5098	3237	136339	6135	3895	64520	2903	464	791	868	415	264	
T41C	59652	4225	2684	1704	60953	2743	1742	43983	1979	299	542	607	278	140	
T42A	173186	3036	7793	4948	141102	6350	4031	83951	3778	501	929	897	495	244	
T42B	118145	4500	5317	3376	100545	4525	2873	72920	3281	398	661	842	417	252	
T42C	98305	3100	4424	2809	73871	3324	2111	76016	3421	387	433	815	253	239	
MÉDIA	126112	4185	5675	3603	121129	5451	3461	71166	3202	433	769	838	394	272	

TABELA 15- VALORES DOS MÓDULO DE ELASTICIDADE, MÓDULO DE RUPTURA E TENSÃO NO LIMITE PROPORCIONAL DA MADEIRA SÓLIDA E LÂMINAS DE *Pinus elliottii* OBTIDOS NO TESTE DE FLEXÃO ESTATICA E COMPRESSÃO, E RELAÇÕES ENTRE O MÓDULO DE ELASTICIDADE LONGITUDINAL - E_L E TANGENCIAL - E_T (EM kgf/cm²)

Repetição	MADEIRA SÓLIDA							LÂMINAS		MÓDULO DE RUPTURA (kgf / cm ²)			TEN. LIM. PROP. (kgf / cm ²)		
	Compressão (kgf / cm ²)				Flexão estática (kgf / cm ²)			Flexão estática (kgf / cm ²)		Compres. paralela madeira	Flexão estática madeira	Flexão estática lâminas	Flexão estática madeira	Compres. paralela madeira	
	Paralela	Perpendicular													
		E _{Lc}	E _T	E _T	E _T	E _{Lf}	E _T	E _T	E _{Lfl}	E _T	F _{Mc}	F _{Mf}	F _{Mfl}	F _{Lf}	F _{Lc}
			0,045 E _{Lc}	E _{Lc} / 35		0,045 E _{Lf}	E _{Lf} / 35		0,045E _{Lfl}						
E11A	119368	5746	5372	3411	112913	5081	3226	54697	2461	464	867	785	299	231	
E11B	60795	5758	2736	1737	81704	3677	2334	35399	1593	330	550	588	207	160	
E11C	36928	3756	1662	1055	63392	2853	1811	21816	982	254	411	392	143	120	
E12A	102044	3521	4592	2916	108572	4886	3102	52911	2381	391	748	752	348	230	
E12B	54454	3935	2450	1556	73743	3318	2107	35139	1581	235	493	513	204	141	
E12C	35787	3756	1610	1022	59363	2671	1696	38019	1711	296	476	537	170	167	
E31A	151251	5087	6806	4321	153774	6920	4394	93255	4196	475	908	1061	531	346	
E31B	106570	3687	4796	3045	87706	3947	2506	80170	3608	361	590	885	293	175	
E31C	33868	3471	1524	968	91525	4119	2615	58269	2622	196	589	709	288	110	
E32A	138934	5773	6252	3970	129387	5822	3697	85672	3855	311	891	947	409	208	
E32B	75794	5560	3411	2166	73170	3293	2091	62087	2794	296	501	730	218	205	
E32C	68395	3908	3078	1954	86949	3913	2484	40810	1836	303	552	625	277	162	
E41A	118364	3557	5326	3382	126678	5701	3619	50916	2291	401	764	729	325	273	
E41B	109681	4819	4936	3134	93882	4225	2682	44890	2020	333	638	673	327	205	
E41C	68490	5051	3082	1957	92327	4155	2638	55075	2478	311	619	794	284	168	
E42A	108995	6349	4905	3114	152150	6847	4347	66577	2996	400	794	822	433	272	
E42B	101507	3599	4568	2900	107350	4831	3067	60867	2739	328	743	750	334	188	
E42C	92798	5909	4176	2651	107388	4832	3068	49347	2221	347	674	629	297	219	
MEDIA	88001	4625	3960	2514	100110	4505	2860	54773	2465	335	656	718	299	199	

Também pode ser observado que, de todas as relações apresentadas para estimar o módulo de elasticidade tangencial (E_T), a relação $E_T = E_{LC}/35$ para *Pinus taeda* e $E_T = 0,045 \cdot E_{Lf}$ para *Pinus elliottii*, foram as de melhor comportamento.

Os valores do módulo de elasticidade obtidos das lâminas (E_{Lfl}) e o módulo de elasticidade tangencial gerado da relação $E_T = 0,045 \cdot E_{Lfl}$, correspondem aos menores valores encontrados no estudo, para as duas espécies.

4.2.2 Determinação das propriedades de resistência à flexão estática convencional dos compensados.

Para comparar as propriedades de resistência à flexão estática dos compensados, obtidas de equações teóricas, foram determinadas as propriedades de resistência à flexão convencional (módulo de elasticidade, módulo de ruptura e tensão no limite proporcional) das chapas em estudo.

A finalidade deste teste é a determinação da resistência e da rigidez do compensado, propriedade de maior importância nos usos estruturais. A rigidez é um indicador de resistência à deformação do material sob tensão expressa em termos de módulo de elasticidade.

As Tabelas 16 e 17 apresentam os resultados para cada repetição, e as estatísticas médias, desvio padrão e coeficiente de variação obtidos no ensaio de flexão estática para as variáveis de resposta, módulo de elasticidade (E_{XT} , E_{YT}), módulo de ruptura (F_{rl} , F_{rt}) e tensão no limite proporcional (F_{al} , F_{at}), para as duas espécies, tanto para o teste realizado com a direção da fibra da face paralela e perpendicular ao vão.

TABELA 16- RESULTADOS MÉDIOS DE FLEXÃO ESTATICA PARALELA E PERPENDICULAR ÀS FIBRAS PARA AS VARIÁVEIS DE RESPOSTA, MÓDULO DE ELASTICIDADE, MÓDULO DE RUPTURA E TENSÃO NO LIMITE PROPORCIONAL DOS COMPENSADOS DE *Pinus taeda* (EM kgf/cm²)

Repetição	TRATAMENTO					
	Módulo de elasticidade		Módulo de ruptura		Tensão no limite proporcional	
	Paralelo Ext	Perpendicular Eyt	Paralelo Frl	Perpendicular Frt	Paralelo Fal	Perpendicular Fat
T11A	106880	34502	773	438	632	314
T11B	67701	26843	660	390	470	265
T11C	63460	22317	609	357	421	244
T12A	118125	30910	852	369	704	281
T12B	80851	23511	638	307	483	211
T12C	72560	19973	552	267	448	195
T21A	71609	27872	600	376	458	269
T21B	68024	24520	565	367	462	255
T21C	67563	22592	555	317	440	219
T22A	94617	27563	698	351	535	254
T22B	69211	25424	576	312	471	231
T22C	78676	23959	611	301	482	225
T41A	93678	34597	665	444	557	302
T41B	77107	27373	630	354	497	272
T41C	50702	16891	501	268	378	196
T42A	98730	31992	623	393	540	286
T42B	86246	24793	580	319	507	234
T42C	71762	21161	513	257	438	207
Média	79861	25933	622	344	496	248
S	16922,77	4831,88	87,08	54,62	77,34	35,67
C.V.	21,19	18,63	13,99	15,89	15,60	14,40

TABELA 17- RESULTADOS MÉDIOS DE FLEXÃO ESTATICA PARALELA E PERPENDICULAR ÀS FIBRAS PARA AS VARIÁVEIS DE RESPOSTA, MÓDULO DE ELASTICIDADE, MÓDULO DE RUPTURA E TENSÃO NO LIMITE PROPORCIONAL DOS COMPENSADOS DE *Pinus elliottii* (EM kgf/cm²)

Repetição	TRATAMENTO					
	Módulo de elasticidade		Módulo de ruptura		Tensão no limite proporcional	
	Paralelo ExT	Perpendicular EyT	Paralelo Frl	Perpendicular Frt	Paralelo Fal	Perpendicular Fat
E11A	53324	19828	626	318	394	172
E11B	40184	15084	522	230	319	135
E11C	31822	11268	396	177	236	93
E12A	65727	21304	628	309	450	196
E12B	50783	16861	508	270	349	159
E12C	36600	13675	397	211	291	128
E31A	114254	35346	899	432	637	285
E31B	86775	28196	699	356	521	216
E31C	58848	19342	506	259	349	147
E32A	88579	31504	699	391	529	270
E32B	64787	20704	514	279	400	157
E32C	59070	21466	476	250	339	149
E41A	69334	26529	586	347	430	198
E41B	77727	22121	701	330	484	185
E41C	47793	17775	525	253	335	158
E42A	93565	25342	727	324	555	205
E42B	73653	22064	549	270	424	176
E42C	61786	19139	477	247	382	139
Média	65267	21530	580	292	412	176
S	21369,82	6104,74	128,78	64,68	102,49	47,85
C.V.	32,74	28,35	22,21	22,16	24,85	27,19

4.2.3 Cálculo do módulo de elasticidade teórico

- Cálculo considerando toda a seção transversal.

A Tabela 18 apresenta as estatísticas médias, desvio padrão e coeficiente de variação obtidas para os valores de módulo de elasticidade teórico dos compensados para as duas espécies, tanto para o teste realizado com a direção das fibras da capa paralela e perpendicular ao vão. Os resultados obtidos para cada repetição, são apresentados em Anexo (A3-1, A3-2, A3-10 e A3-11).

Os valores apresentados correspondem aos resultados de oito equações teóricas (tratamento) para o cálculo do módulo de elasticidade obtidos a partir das relações de $r = E_T/E_L$ e do módulo de elasticidade longitudinal (E_L), como indicado no item 3.7.2.1.

As análises de variância realizadas, conforme resumo apresentado (Anexo A4-1, A4-7), mostraram nas duas espécies, que houve diferença entre os módulos de elasticidade, ao nível de 5% de probabilidade.

Na comparação de interesse para os estudos entre as médias dos módulos de elasticidade teóricos no sentido paralelo e a média do módulo de elasticidade observado (testemunha), foi verificado, com a aplicação do teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade (Anexo A4-13 e A4-22), que a análise de variância dos módulos de elasticidade, para ambas espécies, não mostrou significância estatística, aceitando-se desta forma, a hipótese de igualdade entre as mesmas.

No caso das comparações feitas para os valores médios dos módulos de elasticidade no sentido perpendicular, foi verificado pelo mesmo teste (Anexos A4-14 e A4-23), que somente os valores obtidos das relações (g) e (h) no caso de *Pinus taeda* e da relação (h) no caso de *Pinus elliottii*, mostraram significância estatística.

TABELA 18- RESULTADOS MÉDIOS DO MÓDULO DE ELASTICIDADE TEÓRICO (EM kgf/cm²) DOS COMPENSADOS DE *Pinus taeda* E *Pinus elliottii* CONSIDERADA TODA A SEÇÃO TRANSVERSAL

Propriedade		Ext	Ext (a)	Ext (b)	Ext (c)	Ext (d)	Ext (e)	Ext (f)	Ext (g)	Ext (h)
<i>Pinus taeda</i>	MOE paralelo Média	79861	100751	96805	96654	100630	97068	101061	57234	57059
	S	16922,77	32986,44	22214,34	28393,66	33234,12	28515,25	33376,44	8857,32	8947,90
	C.V.	21,19	32,74	29,15	29,38	33,03	29,38	33,03	15,48	15,69
<i>Pinus elliottii</i>	MOE paralelo Média	65267	70659	80249	79882	70220	80224	70521	44342	43893
	S	21369,82	28050,86	21785,48	21861,41	28180,68	21955,03	28301,36	14677,61	14790,28
	C.V.	32,74	39,70	27,15	27,37	40,13	27,37	40,13	33,10	33,70
		EyT	EyT (a)	EyT (b)	EyT (c)	EyT (d)	EyT (e)	EyT (f)	EyT (g)	EyT (h)
<i>Pinus taeda</i>	MOE perpendicular Média	25933	29546	28509	27936	29085	29512	30726	18117	17339
	S	4831,88	8707,63	7574,73	8206,59	9605,62	8669,58	10147,55	2534,52	2720,46
	C.V.	18,63	29,47	26,57	29,38	33,03	29,38	33,03	13,99	15,69
<i>Pinus elliottii</i>	MOE perpendicular Média	21530	21967	24485	23088	20296	24391	21441	15055	13345
	S	6104,74	7685,21	6071,88	6318,58	8145,03	6675,06	8604,55	4136,77	4496,74
	C.V.	28,35	34,99	24,80	27,37	40,13	27,37	40,13	27,48	33,70

MOE= módulo de elasticidade.

Ext, EyT = módulos de elasticidade real dos compensados no sentido paralelo e perpendicular.

Ext(a), EyT(a), Ext(h), EyT(h) = módulos de elasticidade teóricos dos compensados paralelo e perpendicular (item 3.7.2.1).

$$(a) r = E_T / E_{Lc} \text{ e } E_L = E_{Lc}$$

$$(b) r = E_T / E_{Lf} \text{ e } E_L = E_{Lf}$$

$$(e) r = (E_T = 0,045 \cdot E_{Lf}) / E_{Lf} \text{ e } E_L = E_{Lf}$$

$$(f) r = (E_T = 0,045 \cdot E_{Lc}) / E_{Lc} \text{ e } E_L = E_{Lc}$$

$$(c) r = (E_T = E_{Lf}/35) / E_{Lf} \text{ e } E_L = E_{Lf}$$

$$(d) r = (E_T = E_{Lc}/35) / E_{Lc} \text{ e } E_L = E_{Lc}$$

$$(g) r = E_T / E_{Lfl} \text{ e } E_L = E_{Lfl}$$

$$(h) r = (E_T = 0,045 \cdot E_{Lfl}) / E_{Lfl} \text{ e } E_L = E_{Lfl}$$

Observa-se, nas duas espécies, que os resultados médios para os módulos de elasticidade no sentido paralelo, obtidos das equações (a), (d) e (f) nos quais utilizou-se as propriedades de compressão da madeira (E_T e E_{LC}), e as equações (b), (c) e (e) que utilizaram as propriedades de flexão da madeira (E_{Lf}) são equivalentes. Os resultados para os módulos da elasticidade no sentido perpendicular apresentam o mesmo comportamento ao observado no sentido paralelo.

Apesar das equações (g) e (h) terem sido significativos na estimativa do módulo de elasticidade no sentido paralelo, nas duas espécies, elas representam os menores valores encontrados. Isto pode ter acontecido, provavelmente aos baixos valores das propriedades mecânicas observadas também nas lâminas.

De uma maneira geral, as razões obtidas entre o valor observado e o melhor valor teórico encontrado $E_{XT}/(c) = 0,830$ e $E_{XT}/(c) = 0,930$ para os módulos de elasticidade no sentido paralelo e perpendicular às fibras da capa, para o caso de *Pinus taeda*, e de $E_{XT}/(d) = 0,930$ e $E_{XT}/(f) = 1,004$ no caso de *Pinus elliottii*, mostraram uma tendência semelhante aos apresentados na literatura por FREAS (1964), que observou razões de 1,023 e 0,997. Este autor trabalhou com compensados de Douglas fir composto de 5 lâminas e valores de E_T e E_L obtidos de vigas laminadas.

- Cálculo considerando somente as lâminas paralelas ao vão.

A Tabela 19 apresenta os resultados médios dos módulos de elasticidade teóricos dos compensados, das duas espécies determinados considerando-se atuantes apenas as lâminas com fibras paralelas ao vão. Os resultados obtidos para cada repetição, são apresentados em Anexo (A3-7 e A3-16).

Em função do módulo de elasticidade longitudinal (E_L) considerado no cálculo teórico, indicado no item 3.7.2.2, originaram-se ao todo três equações (a), (b) e (g), tanto para o sentido paralelo e perpendicular.

TABELA 19- RESULTADOS MÉDIOS DA RESISTÊNCIA À FLEXÃO ESTÁTICA TEÓRICA (EM kgf/cm²) DOS COMPENSADOS DE *Pinus taeda* E *Pinus elliottii* CONSIDERADA SÓ AS LÂMINAS PARALELAS

		<i>Pinus taeda</i>				<i>Pinus elliottii</i>			
PROPRIEDADE		Ext	Exp (a)	Exp (b)	Exp (g)	Ext	Exp (a)	Exp (b)	Exp (g)
MOE paralelo	Média	79861	99880	95934	56934	65267	69697	79287	43380
	S	16922,77	32986,61	28182,20	8843,39	21369,82	27970,78	21698,59	14617,53
	C.V.	21,19	33,03	29,38	15,69	32,74	40,13	27,37	33,70
		Frl	Frlp (a)	Frlp (b)	Frlp (c)	Frl	Frlp (a)	Frlp (b)	Frlp (c)
MOR paralelo	Média	622	343	609	663	580	265	520	569
	S	87,08	82,87	149,60	118,90	128,78	57,61	119,33	127,15
	C.V.	13,99	24,18	24,57	17,92	22,21	21,71	22,97	22,36
		Fal	Falp (a)	Falp (b)		Fal	Falp (a)	Falp (b)	
TLP paralelo	Média	496	312	215		412	237	158	
	S	77,34	82,12	60,40		102,49	75,59	46,28	
	C.V.	15,60	26,30	28,07		24,85	31,89	29,38	
PROPRIEDADE		EyT	Eyp (a)	Eyp (b)	Eyp (g)	EyT	Eyp (a)	Eyp (b)	Eyp (g)
MOE perpendicular	Média	25933	26231	25195	14802	21530	18304	20823	11393
	S	4831,88	8663,15	7401,39	2322,51	6104,74	7345,86	5698,62	3838,95
	C.V.	18,63	33,03	29,38	15,69	28,35	40,13	27,37	33,70
		Frt	FrtP (a)	FrtP (b)	FrtP (c)	Frt	FrtP (a)	FrtP (b)	FrtP (c)
MOR perpendicular	Média	344	150	267	290	292	116	227	249
	S	54,62	36,27	65,48	52,05	64,68	25,22	52,23	55,65
	C.V.	15,89	24,18	24,57	17,92	22,16	21,71	22,97	22,36
		Fat	Fatp (a)	Fatp (b)		Fat	Fatp (a)	Fatp (b)	
TLP perpendicular	Média	248	137	94		176	104	69	
	S	35,67	35,95	26,44		47,85	33,09	20,26	
	C.V.	14,40	26,30	28,07		27,19	31,89	29,38	

Ext, EyT, Frl, Frt, Fal, Fat= módulo de elasticidade, ruptura e tensão no limite proporcional real dos compensados no sentido paralelo e perpendicular.

Exp, Eyp = módulos de elasticidade teórico paralelo e perpendicular.

(a) $E_L = E_{Lc}$; (b) $E_L = E_{Lf}$; (g) $E_L = E_{Lfl}$

Frlp, Frtp = módulos de ruptura teórico paralelo e perpendicular

(a) $F_M = F_{Mc}$; (b) $F_M = F_{Mf}$; (c) $F_M = F_{Mfl}$

Falp, Fatp = tensão no limite proporcional teórico paralela e perpendicular

(a) $F_L = F_{Lf}$; (b) $F_L = F_{Lc}$

As análises de variância realizadas (Anexo A4-2 e A4-8), mostraram, para as duas espécies, que houve diferença entre os módulos teóricos, ao nível de 5% de probabilidade.

Na comparação entre as médias dos módulos de elasticidade teóricos e a média do módulo de elasticidade observado (E_{xp} e E_{yp}), comprovou-se com a aplicação do teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade (Anexo A4-15 e A4-24), que a análise de variância dos módulos de elasticidade teóricos calculados da equação (g), apresentou significância estatística, para as duas espécies, e nenhuma significância nos valores calculados das equações (a) e (b).

De uma forma geral, o módulo de elasticidade calculado considerando somente as lâminas paralelas, foi inferior ao módulo de elasticidade calculado considerando toda a seção transversal, sendo em média 0,88% para o sentido paralelo e 11,42% para o perpendicular, no caso de *Pinus taeda*, e de 1,28% e 15,85% para *Pinus elliottii*, porcentagens semelhantes aos encontrados por FREAS (1964), que observou diferenças de 1,05% e 15,23% em compensados compostos de 5 lâminas.

4.2.4 Cálculo do módulo de ruptura teórico

- Cálculo considerando toda a seção transversal

A Tabela 20 apresenta os resultados médios obtidos para os valores de módulo de ruptura teórico dos compensados no sentido paralelo e perpendicular ao vão, para *Pinus taeda* e *Pinus elliottii*. Os valores médios de cada repetição, são apresentados em Anexo (A3-3, A3-4, A3-12 e A3-13).

As equações apresentados para estimar o módulo de ruptura dos compensados, ao todo doze, foram obtidos a partir das combinações entre as relações $r = E_T/E_L$ e o módulo de ruptura longitudinal (F_M), como explicado no item 3.7.3.

TABELA 20- RESULTADOS MÉDIOS DO MÓDULO DE RUPTURA TEÓRICO (EM kgf/cm²) DOS COMPENSADOS DE *Pinus taeda* E *Pinus elliottii* CONSIDERADA TODA A SEÇÃO TRANSVERSAL

Propriedade		Frl	Frl (a1)	Frl (a2)	Frl(a3)	Frl (b1)	Frl (b2)	Frl(b3)	Frl (e1)	Frl (e2)	Frl(e3)	Frl (f1)	Frl (f2)	Frl(f3)
MOR paralelo <i>Pinus taeda</i>	Média	622	346	615	670	346	615	670	347	616	671	347	616	671
	S	87,08	82,97	150,05	118,44	83,02	149,96	118,31	83,85	151,37	120,31	83,85	151,37	120,31
	C.V.	13,99	23,99	24,42	17,69	24,00	24,38	17,67	24,18	24,57	17,92	24,18	24,57	17,92
MOR paralelo <i>Pinus elliottii</i>	Média	580	269	527	577	269	526	576	269	526	575	269	526	575
	S	128,78	57,36	118,73	126,73	57,93	119,74	127,76	58,29	120,74	128,65	58,29	120,74	128,65
	C.V.	22,21	21,29	22,51	21,96	21,56	22,77	22,20	21,71	22,97	22,36	21,71	22,97	22,36
		Frt	Frt (a1)	Frt (a2)	Frt(a3)	Frt (b1)	Frt (b2)	Frt(b3)	Frt (e1)	Frt (e2)	Frt(e3)	Frt (f1)	Frt (f2)	Frt(f3)
MOR perpendicular <i>Pinus taeda</i>	Média	344	160	285	310	160	285	310	163	290	316	163	290	316
	S	54,62	36,80	67,28	50,85	36,96	66,61	50,35	39,41	71,15	56,55	39,41	71,15	56,55
	C.V.	15,89	22,96	23,62	16,40	23,04	23,38	16,23	24,18	24,57	17,92	24,18	24,57	17,92
MOR perpendicular <i>Pinus elliottii</i>	Média	292	129	252	276	127	248	271	126	247	270	126	247	270
	S	64,68	24,69	50,74	54,95	26,36	53,70	57,85	27,40	56,75	60,47	27,40	56,75	60,47
	C.V.	22,16	19,13	20,10	19,88	20,79	21,67	21,32	21,71	22,97	22,36	21,71	22,97	22,36

MOR= módulo de ruptura.

Frl, Frt = módulos de ruptura real dos compensados na direção paralela e perpendicular.

Frl (a1), Frt(a1),, Frl(f3), Frt(f3) = módulos de ruptura teóricos dos compensados na direção paralela e perpendicular.

$$(a1) r = E_T / E_{Lc} \text{ e } F_M = F_{Mc} \quad (b1) r = E_T / E_{Lf} \text{ e } F_M = F_{Mc} \quad (e1) r = (E_T = 0,045 / E_{Lf}) / E_{Lf} \text{ e } F_M = F_{Mc}$$

$$(a2) r = E_T / E_{Lc} \text{ e } F_M = F_{Mf} \quad (b2) r = E_T / E_{Lf} \text{ e } F_M = F_{Mf} \quad (e2) r = (E_T = 0,045 / E_{Lf}) / E_{Lf} \text{ e } F_M = F_{Mf}$$

$$(a3) r = E_T / E_{Lc} \text{ e } F_M = F_{Mfl} \quad (b3) r = E_T / E_{Lf} \text{ e } F_M = F_{Mfl} \quad (e2) r = (E_T = 0,045 / E_{Lf}) / E_{Lf} \text{ e } F_M = F_{Mfl}$$

$$(f1) r = (E_T = 0,045 \cdot E_{Lc}) / E_{Lc} \text{ e } F_M = F_{Mc}$$

$$(f2) r = (E_T = 0,045 \cdot E_{Lc}) / E_{Lc} \text{ e } F_M = F_{Mf}$$

$$(f2) r = (E_T = 0,045 \cdot E_{Lc}) / E_{Lc} \text{ e } F_M = F_{Mfl}$$

Da análise de variância (Anexo A4-3 e A4-9) determinou-se para as duas espécies, diferenças entre os módulos de ruptura calculados, ao nível de 5% de probabilidade.

Na comparação entre as médias dos valores calculados e a média do módulo de ruptura observado (F_{rl} , F_{rt}), foi verificado, com a aplicação do teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade (Anexo A4-16, A4-17, A4-25 e A4-26), que a análise de variância dos módulos de ruptura obtidos das equações (a1), (b1), (e1) e (f1), para os dois sentidos e ambas espécies, mostrou significância estatística, e não mostrou significância nas equações restantes.

Observa-se, nas duas espécies, que as equações que mostraram significância (a1, b1, e1 e f1), são aquelas em que o módulo de ruptura longitudinal, obtido dos ensaios de compressão na madeira (F_{Mc}) foi o utilizado nos cálculos. Nas equações restantes que não mostraram significância, observa-se, a influência do módulo de ruptura longitudinal da madeira e das lâminas (F_{Mf} e F_{Mfl}) obtido do teste de flexão estática.

Analizando as equações que melhor estimaram a resistência dos compensados, observou-se, uma variação de 1,05% a 7,02% para os módulos de ruptura no sentido paralelo e de 9,0% a 16,44% para o sentido perpendicular, em relação ao valor observado, no caso de *Pinus taeda*, e de 0,73% a 9,27% e 6,93% a 14,89% para o sentido paralelo e perpendicular, no caso de *Pinus elliottii*.

De uma forma geral, a razão obtida entre o valor observado e melhor valor teórico encontrado $F_{rl}/616 = 1,010$ e $F_{rt}/316 = 1,088$ para os módulos de ruptura no sentido paralelo e perpendicular, para o caso de *Pinus taeda*, e de $F_{rl}/577 = 1,005$ e $F_{rt}/276 = 1,058$ no caso de *Pinus elliottii*, mostraram-se um pouco maiores às razões apresentadas por FREAS (1964) para compensados de Douglas fir, que observou valores de 0,896 e 0,954 para os dois sentidos.

- Cálculo considerando somente as lâminas paralelas ao vão

A Tabela 19 apresenta os resultados médios dos módulos de ruptura teóricos dos compensados de *Pinus taeda* e *Pinus elliottii*, calculados considerando-se atuantes apenas as lâminas com fibras paralelas ao vão. Os valores médios de cada repetição são apresentados em Anexo (A3-8 e A3-17).

Observa-se, que originaram-se três equações de predição, segundo o módulo de ruptura (F_{Mc} , F_{Mf} e F_{Mfl}) utilizado no cálculo, para os dois sentidos considerados.

As análises de variância realizadas (Anexo A4-4 e A4-10), mostraram, para as duas espécies e nos dois sentidos, que houve diferença entre os módulos de ruptura calculados, ao nível de 5% de probabilidade.

Na comparação entre as médias dos módulos de ruptura teóricos e a média do valor observado (F_{rl} e F_{rt}), verificou-se, por meio do teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade (Anexo A4-18 e A4-27), que tanto para *Pinus taeda* como para *Pinus elliottii* ocorreram diferenças entre os módulos de ruptura no sentido paralelo calculados da equação (a), ao nível de 5% de probabilidade. O teste também mostrou significância estatística, para os valores de módulo de ruptura no sentido perpendicular, obtidos das equações (a), (b) e (c) no *Pinus taeda* e as equações (a) e (b) em *Pinus elliottii*. As equações (c) e (b), para as duas espécies no sentido paralelo, não apresentaram significância estatística, como também a equação (c) no sentido perpendicular em *Pinus elliottii*.

Como pode-se observar, a melhor estimativa do módulo de ruptura calculado considerando somente as lâminas paralelas, quando comparada ao melhor valor teórico encontrado considerando toda a seção transversal, foi de 1,14% e 1,39% menor, para *Pinus taeda* e *Pinus elliottii* no sentido paralelo, e de 9,80% no caso do módulo de ruptura perpendicular para *Pinus elliottii*.

4.2.5 Cálculo da tensão no limite proporcional teórica

As Tabelas 19 e 21 apresentam os valores médios obtidos para a tensão no limite proporcional teórica dos compensados, calculada considerando toda a seção transversal e somente as lâminas paralelas, para as duas espécies em estudo.

TABELA 21- RESULTADOS MÉDIOS DA TENSÃO NO LIMITE PROPORCIONAL TEÓRICA (EM kgf/cm²) DOS COMPENSADOS DE *Pinus taeda* E *Pinus elliottii* CONSIDERADA TODA A SEÇÃO TRANSVERSAL

Propriedade		Fal	Fal (a1)	Fal (a2)	Fal (b1)	Fal (b2)	Fal (e1)	Fal (e2)	Fal (f1)	Fal (f2)
<i>Pinus taeda</i>	TLP paralela Média	496	315	215	315	217	316	218	316	218
	S	77,34	82,40	60,61	82,44	60,64	83,09	61,11	83,09	61,11
	C.V.	15,60	26,15	27,91	26,16	27,91	26,30	28,07	26,30	28,07
<i>Pinus elliottii</i>	TLF paralelo Média	412	241	160	240	159	240	159	240	159
	S	102,49	75,70	46,27	75,97	46,54	76,48	46,83	76,48	46,83
	C.V.	24,85	31,48	28,95	31,67	29,19	31,89	29,38	31,89	29,38
		Fat	Fat (a1)	Fat (a2)	Fat (b1)	Fat (b2)	Fat (e1)	Fat (e2)	Fat (f1)	Fat (f2)
<i>Pinus taeda</i>	TLP perpendicular Média	248	146	101	146	101	148	102	148	102
	S	35,67	37,03	27,26	37,18	27,35	39,06	28,72	39,06	28,72
	C.V.	14,40	25,37	27,09	25,44	27,15	26,30	28,07	26,30	28,07
<i>Pinus elliottii</i>	TLP perpendicular Média	176	115	76	113	75	113	75	113	75
	S	47,85	33,59	20,34	34,33	21,15	35,95	22,01	35,95	22,01
	C.V.	27,19	29,24	26,61	30,42	28,14	31,89	29,38	31,89	29,38

TLP= tensão no limite proporcional.

Fal e Fat = tensão no limite proporcional real dos compensados na direção paralela e perpendicular.

Fal(a1), Fat (a1),, Fal(f2), Fat(f2) = tensões no limite proporcional teórica dos compensados paralelo e perpendicular.

$$(a1) r = E_T / E_{Lc} \text{ e } F_L = F_{Lf}$$

$$(a2) r = E_T / E_{Lc} \text{ e } F_L = F_{Lc}$$

$$(b1) r = E_T / E_{Lf} \text{ e } F_L = F_{Lf}$$

$$(b2) r = E_T / E_{Lf} \text{ e } F_L = F_{Lc}$$

$$(e1) r = (E_T = 0,045 \cdot E_{Lf}) / E_{Lf} \text{ e } F_L = F_{Lf}$$

$$(e2) r = (E_T = 0,045 \cdot E_{Lf}) / E_{Lf} \text{ e } F_L = F_{Lc}$$

$$(f1) r = (E_T = 0,045 \cdot E_{Lc}) / E_{Lc} \text{ e } F_L = F_{Lf}$$

$$(f2) r = (E_T = 0,045 \cdot E_{Lc}) / E_{Lc} \text{ e } F_L = F_{Lc}$$

As análises de variância realizadas, conforme resumo apresentado (Anexo A4-5, A4-6, A4-11 e A4-12), mostraram para as duas espécies, diferenças entre os valores calculados, ao nível de 5% de probabilidade.

Na comparação de interesse, entre as médias das tensões teóricas calculadas nos dois sentidos e a média das tensões observadas, foi verificado, com a aplicação do teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade (Anexo A4-19, A4-20, A4-21, A4-29 e A4-30), que a análise de variância das tensões no limite proporcional para os dois cálculos, em ambas espécies, mostrou significância estatística, portanto, os valores estimados pelas equações teóricas, apresentados no item 3.7.4, são diferentes ao observados.

4.3 RELAÇÕES E PROPRIEDADES DE RESISTÊNCIA E RIGIDEZ À FLEXÃO, DOS COMPENSADOS

Com o objetivo de se determinar as equações estatisticamente mais adequadas que representem as relações entre as propriedades mecânicas à flexão dos compensados, foram pesquisadas várias funções, envolvendo o módulo de ruptura, o módulo de elasticidade (MOE), a tensão no limite proporcional (TLP) e a massa específica das chapas. Foram testadas relações envolvendo exponenciais e polinômios nas variáveis mencionadas.

As equações apresentadas nas Tabelas 22 e 23 foram as de melhor ajuste, aos pontos obtidos da experimentação, para estimar os parâmetros elásticos e de resistência dos compensados, no sentido paralelo e perpendicular, para as duas espécies.

TABELA 22- EQUAÇÕES DE REGRESSÃO PARA AS PROPRIEDADES DE FLEXÃO ESTÁTICA DOS COMPENSADOS DE *Pinus taeda*

a) Para testes paralelos à grã da face

Equação	Modelos e coeficientes	R ²	Syx	Syx (%)
(1)	MOE = 159649,36 Me - 1649,06	0,218	22115,93	27,66
(2)	MOR = 1100,78 Me - 41,87	0,233	146,16	23,42
(3)	MOR = 0,00539 MOE + 192,30	0,653	98,26	15,75
(4)	MOR = 1,091 TLP + 81,614	0,746	54,04	13,47
(5)	TLP = 832,38 Me - 6,637	0,213	117,22	23,63
(6)	TLP = 0,00458 MOE + 130,37	0,752	65,82	13,27
(7)	MOE = 113,89 MOR + 34284,21 Me - 11781,13	0,661	14577,67	18,23
(8)	MOE = 3135,06 + 125,02 MOR - 0,00272 MOR ²	0,653	14742,22	18,44
(9)	MOE = 67494,22 - 115607,75 Me + 222114,55 Me ²	0,224	22065,05	27,60
(10)	MOR = 40,45 + 306,65 Me + 0,00497 MOE	0,668	96,34	15,44
(11)	TLP = 66,22 + 129,55 Me + 0,0044 MOE	0,756	65,36	13,18
(12)	MOR = 244,22 Me + 1,029 TLP - 35,04	0,755	82,63	13,24

b) Para testes perpendiculares à grã da face

(13)	MOE = 64554,48 Me - 13256,08	0,423	5742,08	22,10
(14)	MOR = 753,92 Me - 113,63	0,368	75,27	21,82
(15)	MOR = 0,0107 MOE + 66,503	0,731	49,13	14,24
(16)	MOR = 1,3066 TLP + 20,18	0,778	44,60	12,93
(17)	TLP = 0,0074 MOE + 56,77	0,760	31,29	12,62
(18)	TLP = 499,64 Me - 55,40	0,355	51,35	20,71
(19)	MOE = 20714,88 Me + 58,149 MOR - 6648,53	0,750	3721,82	14,32
(20)	MOR = 109,03 Me + 0,00999 MOE + 18,80	0,735	48,78	14,14
(21)	TLP = 41,17 Me + 0,0071 MOE + 38,75	0,762	31,23	12,59
(22)	MOR = 156,57 Me + 1,196 TLP - 47,403	0,788	43,60	12,64

TABELA 23- EQUAÇÕES DE REGRESSÃO PARA AS PROPRIEDADES DE FLEXÃO ESTÁTICA DOS COMPENSADOS DE *Pinus elliottii*

a) Para testes paralelos à grã da face

Equação	Modelo e coeficientes	R ²	Syx	Syx (%)
(1)	MOE = 212560,37 Me - 52780,40	0,332	21407,95	31,60
(2)	MOR = 1545,56 Me - 279,31	0,416	130,03	21,78
(3)	MOR = 0,00552 MOE + 222,74	0,723	89,46	14,98
(4)	MOR = 1,164 TLP + 100,96	0,819	72,38	12,12
(5)	TLP = 0,00464 MOE + 112,02	0,843	52,39	12,30
(6)	TLP = 1150,41 Me - 226,18	0,381	104,03	24,42
(7)	MOE = 17426,12 Me + 126,26 MOR - 17515,77	0,725	13757,14	20,31
(8)	MOR = 555,48 Me + 0,00466 MOE - 33,47	0,759	83,56	13,99
(9)	TLP = 246,76 Me + 0,00425 MOE - 1,798	0,855	50,46	11,85
(10)	MOR = 333,36 Me + 1,054 TLP - 40,99	0,831	70,03	11,73

b) Para testes perpendiculares à grã da face

(11)	MOE = 601351,17 Me - 11668,85	0,337	5945,44	27,06
(12)	MOR = 0,01014 MOE + 75,954	0,774	39,95	13,36
(13)	MOR = 765,91 Me - 129,79	0,412	64,51	21,58
(14)	MOR = 1,300 TLP + 64,07	0,801	37,53	12,55
(15)	TLP = 0,0693 MOE + 28,223	0,763	28,15	15,64
(16)	TLP = 505,60 Me - 102,42	0,379	45,62	25,34
(17)	MOE = 2769,32 Me + 74,90 MOR - 1947,85	0,775	3469,94	15,79
(18)	MOR = 235,70 Me + 0,00881 MOE + 26,91	0,800	37,65	12,59
(19)	TLP = 134,23 Me + 0,00618 MOE - 30,35	0,781	27,12	15,07
(20)	MOR = 174,62 Me + 1,169 TLP - 10,02	0,814	36,31	12,14

As tentativas para se obter um valor mais elevado de R², com a introdução em cada modelo de pelo menos mais um termo linear ou ao quadrado não foram possíveis, como pode ser evidenciado nas equações 8 e 9.

Observando-se o coeficiente de determinação (R^2) e o erro padrão da estimativa em porcentagem ($S_{xy} \%$), constatam-se que as equações que melhor se ajustaram aos dados para o MOR, são as originadas do modelo 12, 10, 4 e 3, para o MOE as equações 7 e 8 e para a TLP as equações 11 e 6, no caso dos compensados de *Pinus taeda* no sentido paralelo. Para os resultados obtidos no sentido perpendicular às fibras, os modelos que melhor se ajustaram aos dados são os mesmos apresentados para o teste paralelo e os valores de R^2 apresentaram a mesma tendência.

Para o caso dos compensados de *Pinus elliottii*, as equações encontradas (Tabela 23) mostrou a mesma tendência que no caso anterior, sendo o valor R^2 levemente maior.

As Figuras 17, 18 e 19 apresentam para os modelos 1, 2, 3, 4, 5 e 6, respectivamente os gráficos das equações ajustadas, bem como as tendências dos valores ajustados, para os compensados de *Pinus taeda*. Para o caso de *Pinus elliottii*, os gráficos das equações ajustadas e as tendências são apresentados no Anexo 5.

Com relação ao comportamento dos dados nas equações 1, 2 e 5, observa-se que a massa específica não é um indicador muito preciso do módulo de elasticidade (MOE), da resistência (MOR) e da tensão no limite proporcional TLP. De uma maneira geral, apesar da dispersão dos valores, nota-se que um aumento na massa específica do compensado implica em um aumento de MOE, MOR e TLP. Isto pode ter acontecido pela diferença de massa específica que existe através de toda a chapa, devido às propriedades específicas de cada uma das lâminas componentes do compensado, as quais não são mensuráveis e passam a ser absorvidas pela construção do painel.

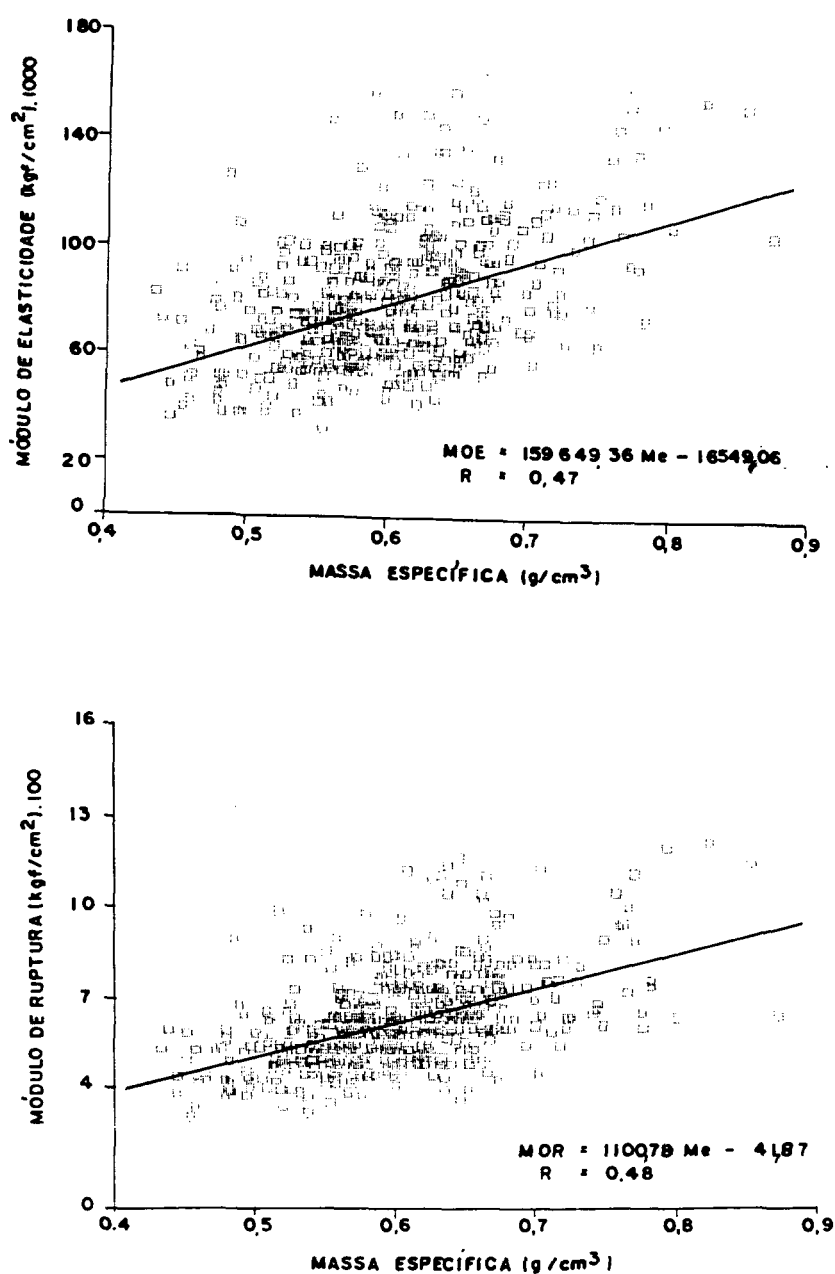


FIGURA 17- REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DAS EQUAÇÕES DE REGRESSÃO SIMPLES, AJUSTADAS PARA O MÓDULO DE ELASTICIDADE, MÓDULO DE RUPTURA E A MASSA ESPECÍFICA PARA COMPENSADOS DE *Pinus taeda*

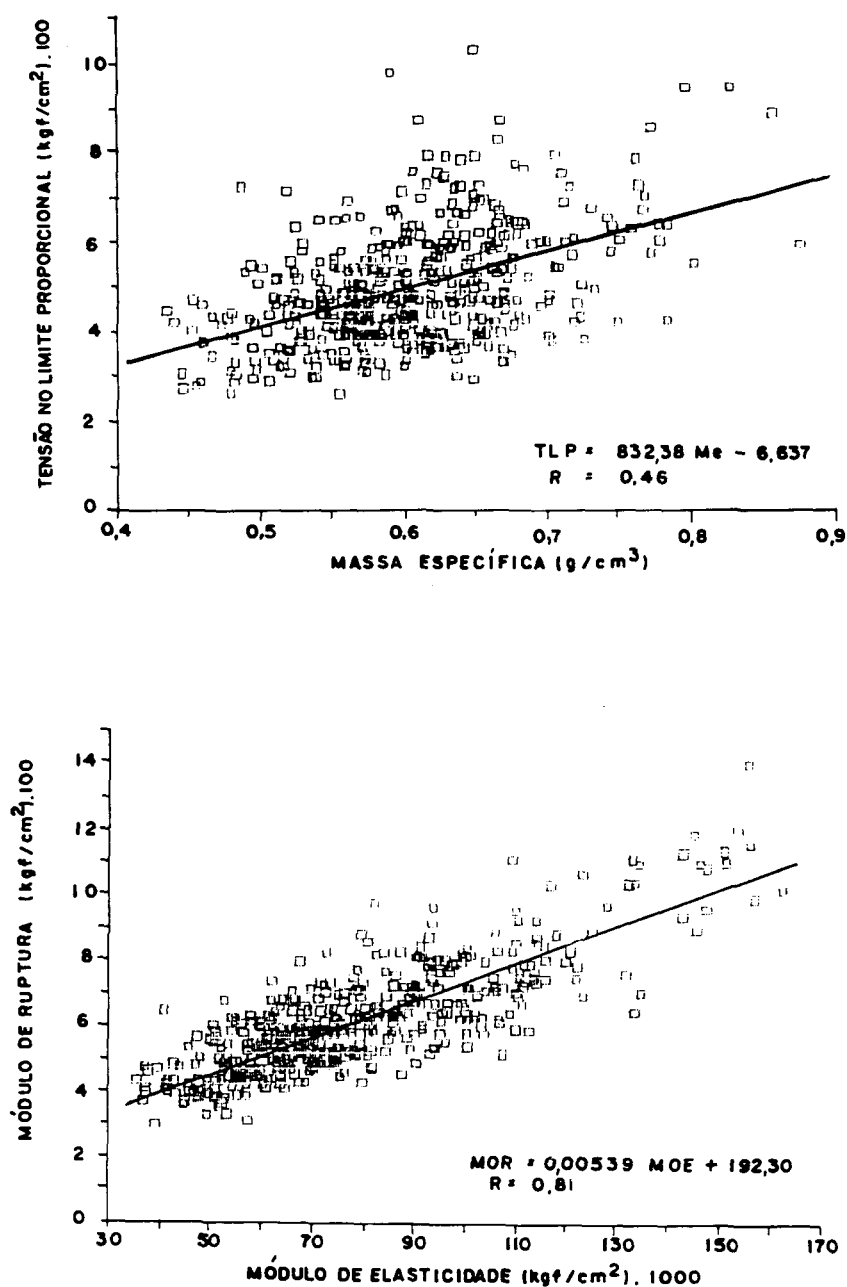


FIGURA 18- REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DAS EQUAÇÕES DE REGRESSÃO SIMPLES, AJUSTADAS PARA A TENSÃO NO LIMITE PROPORCIONAL E A MASSA ESPECÍFICA, MÓDULO DE RUPTURA E MÓDULO DE ELASTICIDADE PARA COMPENSADOS DE *Pinus taeda*

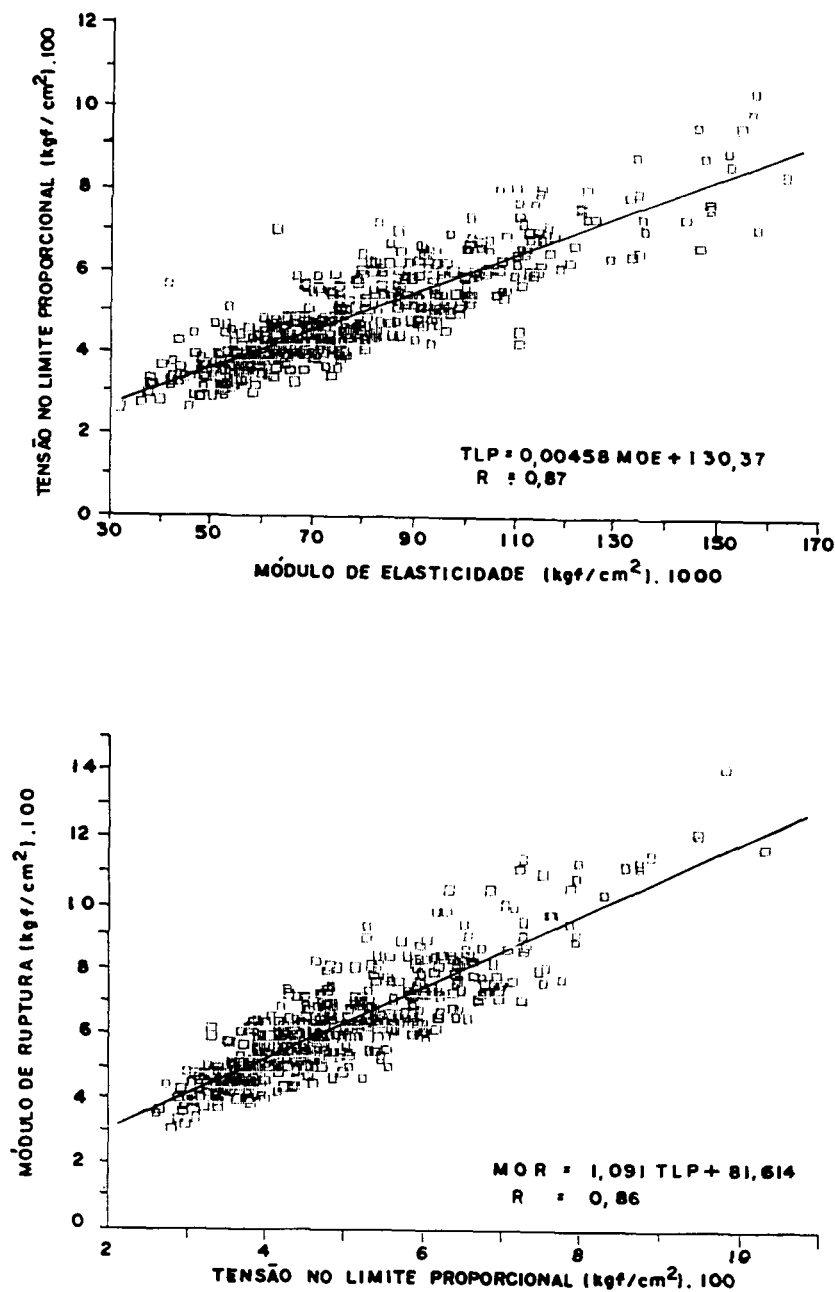


FIGURA 19- REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DAS EQUAÇÕES DE REGRESSÃO SIMPLES. AJUSTADAS PARA A TENSÃO NO LIMITE PROPORCIONAL E O MÓDULO DE ELASTICIDADE, O MÓDULO DE RUPTURA E A TENSÃO NO LIMITE PROPORCIONAL PARA COMPENSADOS DE *Pinus taeda*

Existem diferenças de massa específica entre as lâminas originadas devido à procedência do material dentro da árvore, e também pelo processo de desenrolamento (lenho tardio, lenho inicial, ou ambos misturados). Estas diferenças são mais explícitas quando são usados corpos de provas pequenos na medição da massa específica e nos ensaios de flexão estática.

Além disso, pode-se observar, dos histogramas de frequências da Figura 20, que a massa específica apresentou uma distribuição unimodal quase retangular ou homogênea, enquanto que as propriedades de resistência mecânica (MOE e MOR) apresentaram uma distribuição unimodal mais acentuada. Segundo BIER (1984), a razão desta variabilidade nas propriedades de resistência e rigidez dos compensados, é originada pelas propriedades de resistência da lâmina mais externa sob tensão e paralela ao vão do painel. Esta lâmina pode ser inteiramente de lenho inicial, que é de baixa massa específica e governa a resistência à flexão do corpo de prova, resultando assim, em valores baixos para um painel de alta massa específica aparente.

Com relação ao comportamento dos dados das equações 3, 4, 15 e 16 para os compensados de *Pinus taeda*, observa-se que a resistência mecânica está bem correlacionada com o módulo de elasticidade e a tensão no limite proporcional, melhorando muito pouco com a inclusão da massa específica. Este comportamento é semelhante para as relações encontradas nos compensados de *Pinus elliottii*.

Os resultados das equações para a tensão no limite proporcional (TLP) em ambas espécies apresentaram quase o mesmo desempenho que no caso do MOR, valores de R^2 pouco maior.

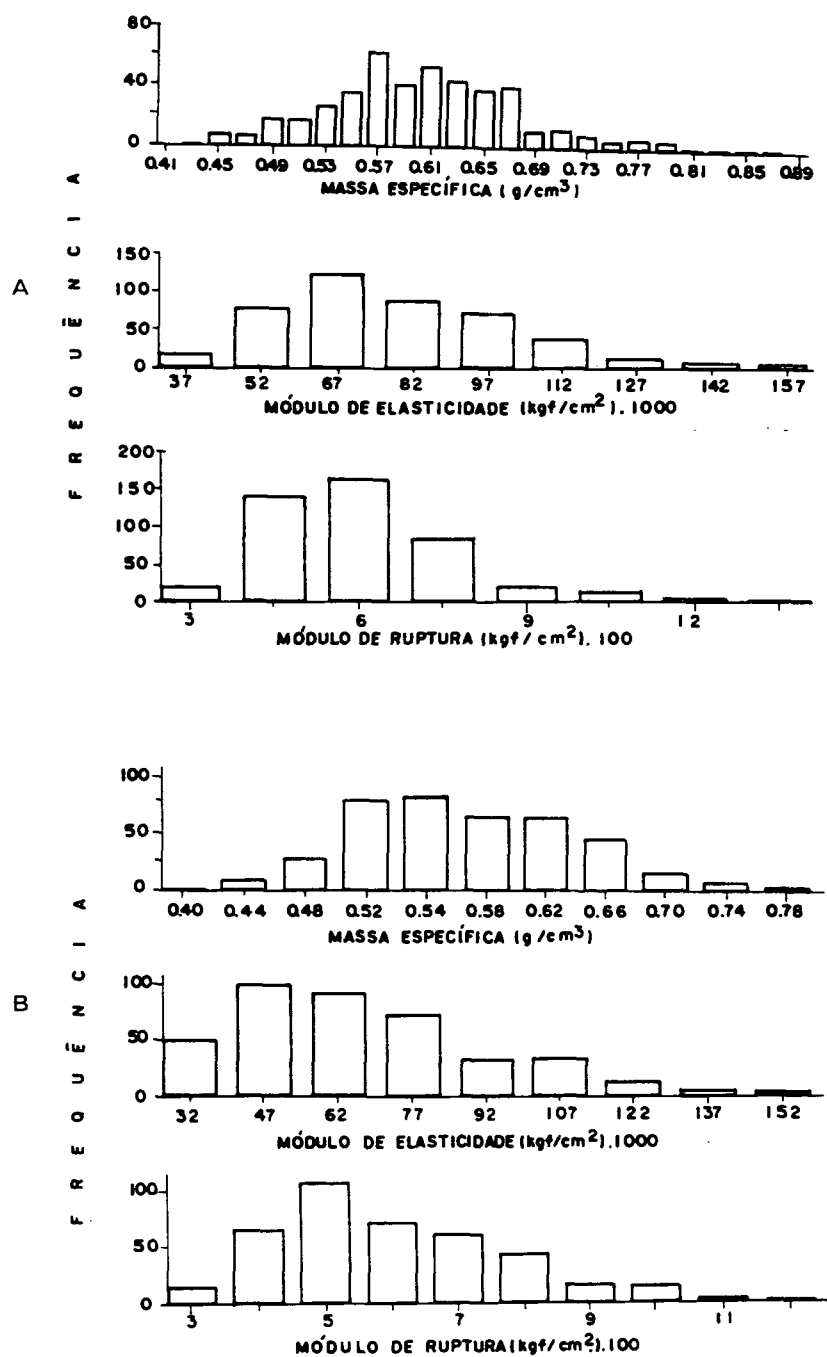


FIGURA 20- REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DA VARIAÇÃO DE FREQUÊNCIAS DA MASSA ESPECÍFICA, MÓDULO DE ELASTICIDADE E MÓDULO DE RUPTURA PARA COMPENSADOS DE *Pinus taeda* (A) E *Pinus elliottii* (B)

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A sistemática adotada possibilitou uma perfeita caracterização do material, e desenvolvimento de modelos para estimar propriedades dos compensados e correlacioná-las, considerando as limitações deste experimento.

Com base nos resultados apresentados, para as propriedades, pode-se concluir que:

1. Os valores da massa específica variaram consideravelmente no sentido radial (medula-casca) na madeira de *Pinus taeda* e *Pinus elliottii*. Variações similares também ocorreram nas lâminas de madeira e compensados. A diferença da massa específica no sentido medula-casca para a madeira foi aproximadamente de 24-26%, nas lâminas de 23-45% e nos compensados de 15-21%.

2. A resistência mecânica à flexão estática (nas duas espécies) variaram no sentido medula-casca na madeira, nas lâminas e nos compensados para as mesmas posições estudadas. Os resultados obtidos para as propriedades mecânicas seguem, de maneira geral, a tendência apresentada pela massa específica no sentido radial. Esta análise é importante, no sentido de aproveitar o material nas regiões de maior resistência da tora para produtos seletivos.

3. As propriedades de resistência à flexão estática, em termos de módulo de ruptura (MOR), módulo de elasticidade (MOE) e tensão no limite proporcional (TLP) da madeira, mostraram boas correlações r (0,65 a 0,84) ajustadas para regressão linear simples, indicando uma grande dependência da massa específica.

4. O módulo de elasticidade (MOE) e o módulo de ruptura (MOR) obtidos do teste de flexão estática das lâminas, mostraram altas correlações r (0,72 a 0,79 - MOE e 0,81 a 0,84 - MOR) ajustadas para regressão linear simples, indicando uma grande dependência da massa específica.

5. As propriedades de resistência dos compensados, em termos de módulo de elasticidade, módulo de ruptura e tensão no limite proporcional de flexão estática, mostraram baixos coeficientes de correlação e determinação (R^2) ajustados por regressão linear simples (nas duas espécies), indicando pouca dependência da massa específica.

6. A resistência dos compensados, em termos de módulo de ruptura à flexão estática, nos dois sentidos testados, para as duas espécies, mostrou uma forte dependência do módulo de elasticidade e tensão no limite proporcional. Os coeficientes de correlação obtidos foram altos (0,81 a 0,87) para *Pinus taeda* e (0,85 a 0,90) para *Pinus elliottii*.

7. A massa específica e as propriedades mecânica (MOE e MOR) da madeira, mostraram ser estimadores pouco aceitáveis, através da análise de regressão simples, para a massa específica e as propriedades mecânicas dos compensados, apesar de apresentarem a mesma tendência de aumentar no sentido medula-casca.

8. As propriedades de resistência (MOE e MOR) à flexão estática dos compensados, nos sentidos paralelo e perpendicular, nas duas espécies, podem ser determinadas através de cálculos teóricos considerando a metodologia de cálculo proposta e as propriedades mecânicas da madeira e lâminas obtidas de flexão estática e compressão.

Com relação aos cálculos teóricos desenvolvidos, para estimar as propriedades mecânicas dos compensados, conclui-se que:

a) A utilização das equações teóricas propostas permite a determinação do módulo de elasticidade paralelo e perpendicular, do compensado admitido como ortotrópico, considerando no cálculo, os valores do módulo de elasticidade

longitudinal da madeira e lâminas obtidas tanto de flexão estática como de compressão paralela às fibras. As estimativas têm melhor desempenho quando são utilizadas as propriedades da madeira. Os valores estimados variaram de 8 a 16% no sentido paralelo e de 1 a 7% no sentido perpendicular.

b) O módulo de elasticidade do compensado, pode também ser estimado teoricamente, considerando no cálculo proposto somente atuantes as lâminas sob tensão paralelas ao vão. Os valores obtidos desta forma apresentaram uma variação de aproximadamente 6%, com respeito aos valores obtidos, considerando todas as lâminas atuantes.

c) A resistência do compensado, em termos de módulo de ruptura paralelo e perpendicular ao vão, pode ser estimado através das equações teóricas propostas, utilizando no cálculo, os valores do módulo de ruptura da madeira e lâminas obtidos do ensaio de flexão estática. Os valores estimados variaram de 1% a 6% em relação aos valores observados, nas duas espécies.

O módulo de ruptura, pode ser também calculado teoricamente, considerando atuantes somente as lâminas sob tensão paralelas ao vão. Os melhores resultados obtidos desta forma mostraram-se menores (1% no sentido paralelo e 10% no sentido perpendicular), comparados aos calculados considerando toda a seção transversal.

d) A utilização da metodologia de ensaios proposta não permite a determinação da tensão no limite proporcional do compensado.

e) A determinação do módulo de elasticidade transversal (E_T) da madeira pode ser efetuada através das relações $E_T = E_L/35$ e $E_T = 0,045 \cdot E_L$

f) A relação encontrada entre o módulo de elasticidade transversal e longitudinal (E_T/E_L) da madeira, através de ensaios convencionais de flexão

estática e compressão paralela e perpendicular às fibras, foi de 0,030 a 0,050%, para ambas espécies.

9. Os compensados de *Pinus taeda* e *Pinus elliottii*, apresentam características bastante satisfatórias, com relação às propriedades de resistência e rigidez em flexão estática. De maneira geral, o comportamento foi semelhante aos resultados encontrados em outros trabalhos, em termo de MOE e MOR para todos os compensados.

Com base nas conclusões recomenda-se:

a) A condução de pesquisas visando a determinação teórica das propriedades dos compensados submetidos à tração e compressão paralela.

b) Desenvolver estudos no sentido de determinar o módulo de elasticidade transversal (G_{xy}) e os coeficientes de Poisson (ν_{xy} e ν_{yx}) dos compensados.

c) Estudar as propriedades de flexão estática dos compensados a partir de corpos de provas de tamanho maior (painéis).

d) Analisar outras variáveis que influenciam as propriedades dos compensados, tais como: número e espessura das lâminas que compõem o painel.

e) Determinar o módulo de elasticidade perpendicular às fibras (E_T), através de ensaios em corpos de provas laminados em uma só direção.

f) Levar em consideração a variação das propriedades da madeira no tronco das árvores, das espécies em questão, nos estudos de desenvolvimento de produtos e sua aplicação.

g) Desenvolver estudos semelhantes no sentido de verificar a influência da espécie em parâmetros elásticos e de resistência de chapas de partículas.

ANEXO 1

CÁLCULO DE PROPRIEDADES ELÁSTICAS E DE RESISTÊNCIA EM
COMPENSADOS SUBMETIDOS À COMPRESSÃO E TRAÇÃO AXIAL

A1-1 Determinação de propriedade elásticas e de resistência em compensados submetidos à compressão paralela, segundo a metodologia proposta por GURFINKEL (1973) e FOREST PRODUCT LABORATORY (1987).

a) Módulo de elasticidade

$$\bar{E}_{xc} \quad \text{ou} \quad \bar{E}_{yc} = \frac{1}{h} \sum_{i=1}^{i=n} E_i \cdot h_i$$

onde,

\bar{E}_{xc} = módulo de elasticidade de um compensado em compressão, com a direção da grã da capa paralela ao vão.

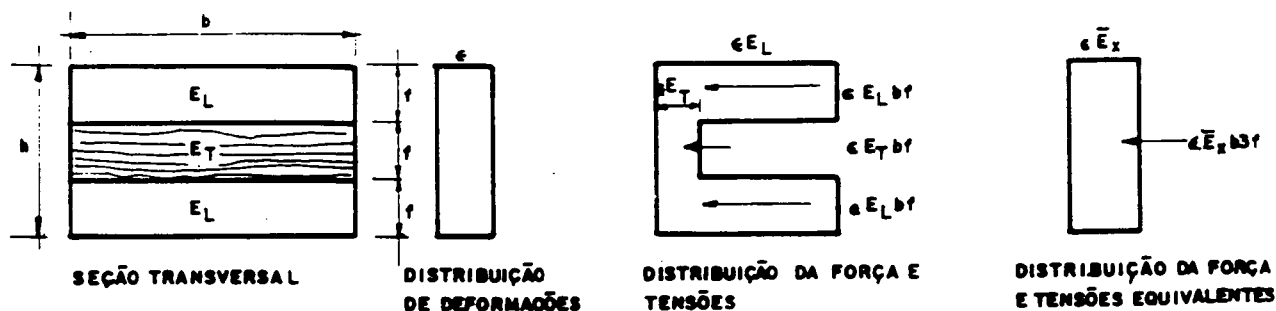
\bar{E}_{vc} = módulo de elasticidade de um compensado em compressão, com a direção da grã da capa perpendicular ao vão.

E_i = módulo de elasticidade da i-ésima lâmina paralela à aplicação da carga

h = espessura do compensado

h_i = espessura da i-ésima lâmina.

A expressão geral acima para \bar{E}_{xc} e \bar{E}_{yc} foi obtida através do procedimento da figura 15, que mostra um painel compensado de três lâminas, da mesma espessura t e largura b , submetido a compressão ou tração axial segundo (GURFINKEL, 1973).



$$N = 2 \cdot \varepsilon \cdot E_L \cdot b \cdot t + \varepsilon \cdot E_T \cdot b \cdot t = \varepsilon \cdot E_w \cdot b \cdot 3t; \quad E_w = 1/3(2 \cdot E_L + E_T)$$

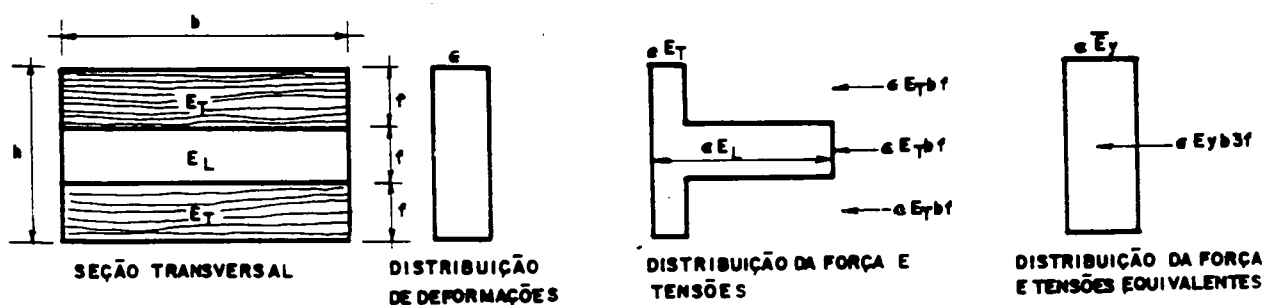
$$\varepsilon \cdot E_L = F_c, \quad \varepsilon \cdot E_T = F_c(E_T/E_L) \quad \text{e} \quad \varepsilon \cdot E_w = F_{cw}$$

$$N = 2 \cdot F_c \cdot b \cdot t + F_c \cdot (E_T/E_L) \cdot b \cdot t = F_{cw} \cdot b \cdot 3t; \quad F_{cw} = F_c(E_w/E_L)$$

$$E_w = \bar{E}_{xc}; \quad \varepsilon = \text{distribuição de deformações}$$

$$N = \text{força axial na seção}$$

a) Tensão axial paralela à grã da capa



$$N = 2 \cdot \varepsilon \cdot E_L \cdot b \cdot t + \varepsilon \cdot b \cdot t = \varepsilon \cdot E_x \cdot b \cdot 3t; \quad E_x = 1/3(E_L + 2 \cdot E_T)$$

$$\text{também, } \varepsilon \cdot E_L = F_c, \quad \varepsilon \cdot E_T = F_c(E_T/E_L) \quad \text{e} \quad \varepsilon \cdot E_x = F_{cx} \quad \text{Assim,}$$

$$N = 2 \cdot F_c \cdot (E_T/E_L) \cdot b \cdot t + F_c \cdot b \cdot t = F_{cx} \cdot b \cdot 3t; \quad \text{assim, } F_{cx} = F_c(E_w/E_L)$$

$$E_x = \bar{E}_{yc}$$

b) Tensão axial perpendicular à grã da capa

FIGURA 21- DETERMINAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE E A RESISTÊNCIA EM UM PAINEL COMPENSADO SUBMETIDO À COMPRESSÃO OU TRAÇÃO AXIAL.

Quando todas as camadas do painel compensado são da mesma espessura e espécie de madeira, a equação geral se reduz a:

$$\bar{E}_{xc} = \frac{1}{2n}[(E_L + E_T) \cdot n + (E_L - E_T)]$$

$$\bar{E}_{yc} = \frac{1}{2n}[(E_L + E_T) \cdot n - (E_L - E_T)]$$

onde,

E_L = módulo de elasticidade das lâminas paralela à grã.

E_T = módulo de elasticidade das lâminas na direção tangencial.

n = número de lâminas.

O módulo de elasticidade em compressão de um compensado, para ângulos da grã da face diferente de 0° ou 90° , é dado aproximadamente, pela seguinte expressão:

$$\frac{1}{E_\theta} = \frac{1}{\bar{E}_{xc}} \cos^4 \theta + \frac{1}{\bar{E}_{yc}} \sin^4 \theta + \frac{1}{G_{xy}} \sin^2 \theta \cdot \cos^2 \theta$$

onde,

E_θ = é o módulo de elasticidade de uma ripa compensada submetida à compressão em um ângulo θ em relação a grã da capa.

G_{xy} = é o módulo de rigidez do compensado.

b) Resistência

A resistência de um compensado submetido às forças axiais é dada pelas seguintes equações:

$$F_{xc} = \frac{\bar{E}_{xc}}{E_{cL}} \cdot F_{cL} \quad F_{yc} = \frac{\bar{E}_{yc}}{E_{cL}} \cdot F_{cL}$$

onde,

F_{xc} = resistência à compressão do compensado paralelo à grã da capa

F_{yc} = resistência à compressão do compensado perpendicular à grã da capa

F_{cL} = resistência à compressão das lâminas paralelas à grã

E_{cL} = E_L = é o módulo de elasticidade das lâminas paralelas ao vão. Se mais de uma espécie é utilizada no arranjo longitudinal das lâminas, utiliza-se na equação os valores de E_L da espécie que tenha a menor razão de F_{cL}/E_{cL} .

A resistência à compressão de um compensado para um certo ângulo com respeito à grã da capa, é calculada pela seguinte relação:

$$F_{c\theta} = \frac{1}{\sqrt{\frac{\cos^4 \theta}{F_{xc}^2} + \frac{\sin^4 \theta}{F_{yc}^2} + \left(\frac{1}{F_{sxy}^2} - \frac{1}{F_{xc} \cdot F_{yc}} \right) \cdot \sin^2 \theta \cdot \cos^2 \theta}}$$

onde,

$F_{c\theta}$ = resistência à compressão de um compensado para um ângulo θ da grã da capa

F_{sxy} = resistência do compensado ao cisalhamento.

A1-2 Determinação de propriedade elásticas e de resistência de um compensado submetido à tração axial

Valores do módulo de elasticidade e de resistência à tração paralela e perpendicular às fibras de um compensado, podem ser obtidos através das mesmas relações utilizadas na compressão paralela.

ANEXO 2

ANÁLISE DE VARIÂNCIA E TESTES DE TUKEY

A2-1. ANÁLISE DE VARIÂNCIA DA RESISTÊNCIA À FLEXÃO ESTÁTICA E DA MASSA ESPECÍFICA DA MADEIRA DE *Pinus Taeda*

Fonte de Variação	G.L.	Massa Específica			Módulo de Elasticidade MOE		
		SQ	QM	F	SQ	QM	F
Tratamento	2	0,065	0,032	20,80**	13696393984,111	6848196992,056	13,12**
Erro	15	0,023	0,002		7828858642,167	521923909,478	
Total	17	0,088			21525252626,278		

Fonte de Variação	G.L.	Módulo de Ruptura MOR			Tensão no Limite Proporcional TLP		
		SQ	QM	F	SQ	QM	F
Tratamento	2	385582,111	192791,056	13,09**	166179,111	83089,556	62,72**
Erro	15	220999,000	14733,267		19872,667	1324,844	
Total	17	606581,111			186051,778		

F.tab.(95%, 2,15) = 3,68

F.tab.(99%, 2,15) = 6,36

A2-2. ANÁLISE DE VARIÂNCIA DA RESISTÊNCIA À FLEXÃO ESTÁTICA E DA MASSA ESPECÍFICA DA MADEIRA DE *Pinus elliottii*

Fonte de Variação	G.L.	Massa Específica			Módulo de Elasticidade MOE		
		SQ	QM	F	SQ	QM	F
Tratamento	2	0,067	0,033	35,97**	8398226070,111	4199113035,056	14,41**
Erro	15	0,014	0,001		4371446904,833	291429793,656	
Total	17	0,081			12769672974,944		

Fonte de Variação	G.L.	Módulo de Ruptura MOR			Tensão no Limite Proporcional TLP		
		SQ	QM	F	SQ	QM	F
Tratamento	2	271460,333	135730,167	17,79**	76723,111	38361,556	7,36**
Erro	15	114463,667	7630,911		78138,500	5209,233	
Total	17	385924,000			154861,611		

F.tab.(95%, 2,15) = 3,68

F.tab.(99%, 2,15) = 6,36

A2-3. ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA MASSA ESPECÍFICA E RESISTÊNCIA À FLEXÃO ESTATICA PARALELA ÀS FIBRAS DE COMPENSADOS DE *Pinus taeda*

Fonte de Variação	G.L.	Massa Específica			Módulo de Elasticidade MOE		
		SQ	QM	F	SQ	QM	F
Tratamento	2	0,025	0,013	11,63**	2892988108,111	1446494054,056	10,98**
Erro	15	0,016	0,001		1975474661,000	131698310,733	
Total	17	0,041			4868462769,111		

Fonte de Variação	G.L.	Módulo de Ruptura MOR			Tensão no Limite Proporcional TLP		
		SQ	QM	F	SQ	QM	F
Tratamento	2	67836,000	33918,000	6,89**	57674,778	28837,389	9,83**
Erro	15	73876,500	4925,100		44002,833	2933,522	
Total	17	141712,500			101677,611		

F.tab.(95%, 2,15) = 3,68

F.tab.(99%, 2,15) = 6,36

A2-4. ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA MASSA ESPECÍFICA E RESISTÊNCIA À FLEXÃO ESTATICA PERPENDICULAR ÀS FIBRAS DE COMPENSADOS DE *Pinus taeda*

Fonte de Variação	G.L.	Massa Específica			Módulo de Elasticidade MOE		
		SQ	QM	F	SQ	QM	F
Tratamento	2	0,036	0,018	12,70**	307909537,444	153954768,722	25,95**
Erro	15	0,021	0,001		88990545,500	5932703,033	
Total	17	0,057			396900082,944		

Fonte de Variação	G.L.	Módulo de Ruptura MOR			Tensão no Limite Proporcional TLP		
		SQ	QM	F	SQ	QM	F
Tratamento	2	30445,778	15222,889	11,26**	14787,111	7393,556	16,21**
Erro	15	20271,833	1351,456		6842,000	456,133	
Total	17	50717,611			21629,000		

F.tab.(95%, 2,15) = 3,68

F.tab.(99%, 2,15) = 6,36

A2-5. ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA MASSA ESPECÍFICA E RESISTÊNCIA À FLEXÃO ESTÁTICA PARALELA ÀS FIBRAS DE COMPENSADOS DE *Pinus elliottii*

Massa Específica					Módulo de Elasticidade MOE		
Fonte de Variação	G.L.	SQ	QM	F	SQ	QM	F
Tratamento	2	0,053	0,027	34,05**	2980094981,778	1490047490,889	4,67*
Erro	15	0,012	0,001		4783280997,833	318885399,856	
Total	17	0,065			7763375979,611		

Módulo de Ruptura MOR					Tensão no Limite Proporcional TLP		
Fonte de Variação	G.L.	SQ	QM	F	SQ	QM	F
Tratamento	2	160599,111	80299,556	9,93**	94288,778	47144,389	8,39**
Erro	15	121324,500	8088,300		84277,667	5618,511	
Total	17	281923,611			178566,443		

F.tab.(95%, 2,15) = 3,68

F.tab.(99%, 2,15) = 6,36

A2-6. ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA MASSA ESPECÍFICA E RESISTÊNCIA À FLEXÃO ESTÁTICA PERPENDICULAR ÀS FIBRAS DE COMPENSADOS DE *Pinus elliottii*

Massa Específica					Módulo de Elasticidade MOE		
Fonte de Variação	G.L.	SQ	QM	F	SQ	QM	F
Tratamento	2	0,053	0,026	21,60**	276850105,444	138425052,722	5,82*
Erro	15	0,018	0,001		356702409,000	23780160,600	
Total	17	0,071			633552514,444		

Módulo de Ruptura MOR					Tensão no Limite Proporcional TLP		
Fonte de Variação	G.L.	SQ	QM	F	SQ	QM	F
Tratamento	2	43745,333	21872,667	11,98**	22032,111	11016,056	9,77**
Erro	15	27375,167	1825,011		16912,833	1127,522	
Total	17	71120,500			38944,944		

F.tab.(95%, 2,15) = 3,68

F.tab.(99%, 2,15) = 6,36

A2-7. ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA MASSA ESPECÍFICA E DA RESISTÊNCIA À FLEXÃO ESTÁTICA DE LÂMINAS DE MADEIRA DE *Pinus taeda*

Fonte de Variação	G.L.	Massa Específica			Módulo de Elasticidade MOE		
		SQ	QM	F	SQ	QM	F
Tratamento	2	0,058	0,029	12,76**	1182359136,333	591179568,167	9,46**
Erro	15	0,034	0,002		937152548,167	62476836,544	
Total	17	0,092			2119511684,500		

Módulo de Ruptura				
Fonte de Variação	G.L.	SQ	QM	F
Tratamento	2	157761,444	78880,722	11,40**
Erro	15	103753,500	6916,900	
Total	17	261514,944		
F.tab.(95%, 2,15) = 3,68				
F.tab.(99%, 2,15) = 6,36				

A2-8. ANÁLISE DE VARIÂNCIA DA MASSA ESPECÍFICA E DA RESISTÊNCIA À FLEXÃO ESTÁTICA DE LÂMINAS DE MADEIRA DE *Pinus elliottii*

Fonte de Variação	G.L.	Massa Específica			Módulo de Elasticidade MOE		
		SQ	QM	F	SQ	QM	F
Tratamento	2	0,054	0,027	15,58**	1492420590,111	746210295,056	2,71 ^{ns}
Erro	15	0,026	0,002		4126093958,333	275072930,556	
Total	17	0,080			5618514548,444		

Módulo de Ruptura				
Fonte de Variação	G.L.	SQ	QM	F
Tratamento	2	172731,000	86365,500	4,88*
Erro	15	265411,500	17694,100	
Total	17	438142,500		
F.tab.(95%, 2,15) = 3,68				
F.tab.(99%, 2,15) = 6,36				

A2- 9. TESTE DE TUKEY PARA OS VALORES MÉDIOS DA MASSA ESPECÍFICA E DA RESISTÊNCIA À FLEXÃO ESTÁTICA NAS TRÊS POSIÇÕES (A, B e C) DE *Pinus taeda*

Massa Específica			
	A	B	C
	0,596	0,524	0,449
C	0,449	0,147**	0,075*
B	0,524	0,072*	0
A	0,596	0	
Comparador A 95% = 0,059			

Módulo de Elasticidade (MOE)			
	A	B	C
	154308,33	122308,83	86771,00
C	86771,00	67537,33**	35537,83*
B	122308,83	31999,50 ^{ns}	0
A	154308,33	0	
Comparador A 95% = 34228,98			

Módulo de Ruptura (MOR)				
	A	B	C	
	951,16	762,33	592,83	
C	592,83	358,33**	169,50 ^{ns}	0
B	762,33	188,83*	0	
A	951,16	0		
Comparador A 95% = 181,86				

Tensão no Limite Proporcional (TLP)				
	A	B	C	
	493,66	434,00	266,66	
C	266,66	227,00**	167,33**	0
B	434,00	59,66*	0	
A	493,66	0		
Comparador A 95% = 54,54				

A2-10. TESTE DE TUKEY PARA OS VALORES MÉDIOS DA MASSA ESPECÍFICA E DA RESISTÊNCIA À FLEXÃO ESTÁTICA NAS TRÊS POSIÇÕES (A, B e C) DE *Pinus elliottii*

Massa Específica				
	A	B	C	
	0,545	0,439	0,401	
C	0,401	0,144**	0,038 ^{ns}	0
B	0,439	0,106**	0	
A	0,545	0		
Comparador A 95% = 0,046				

Módulo de Elasticidade (MOE)				
	A	B	C	
	130579,00	86140,50	83490,66	
C	83490,66	47088,33**	2649,83 ^{ns}	0
B	86140,50	44438,50**	0	
A	130579,00	0		
Comparador A 95% = 25577,45				

Módulo de Ruptura (MOR)				Tensão no Limite Proporcional (TLP)					
	A	B	C		A	B	C		
	828,66	585,83	553,50		390,83	263,83	243,16		
C	553,50	275,16**	32,33 ^{ns}	0	C	243,16	147,66**	20,66 ^{ns}	0
B	585,83	242,83**	0		B	263,83	127,00*	0	
A	828,66	0			A	390,83	0		
Comparador A 95% = 130,88				Comparador A 95% = 108,13					

A2-11. TESTE DE TUKEY PARA OS VALORES MÉDIOS DA MASSA ESPECÍFICA E DA RESISTÊNCIA À FLEXÃO ESTÁTICA PARALELA ÀS FIBRAS NAS TRÊS POSIÇÕES (A, B e C) DOS COMPENSADOS DE *Pinus taeda*

Massa Específica				
	A	B	C	
	0,652	0,599	0,560	
C	0,560	0,062*	0,038 ^{ns}	0
B	0,599	0,053*	0	
A	0,652	0		
Comparador A 95% = 0,049				

Módulo de Elasticidade (MOE)				
	A	B	C	
	97273,17	74856,67	67453,83	
C	67453,83	29819,33**	7402,83 ^{ns}	0
B	74856,67	22416,50**	0	
A	97273,17	0		
Comparador A 95% = 17194,14				

Módulo de Ruptura (MOR)				
	A	B	C	
	701,83	594,83	556,83	
C	556,83	145,00**	38,00 ^{ns}	0
B	594,83	107,00*	0	
A	701,83	0		
Comparador A 95% = 105,15				

Tensão no Limite Proporcional (TLP)				
	A	B	C	
	571,00	481,67	434,50	
C	434,50	136,50**	44,17 ^{ns}	0
B	481,67	89,33*	0	
A	571,00	0		
Comparador A 95% = 81,15				

A2-12. TESTE DE TUKEY PARA OS VALORES MÉDIOS DA MASSA ESPECÍFICA E DA RESISTÊNCIA À FLEXÃO ESTÁTICA PERPENDICULAR ÀS FIBRAS NAS TRÊS POSIÇÕES (A, B e C) DOS COMPENSADOS DE *Pinus taeda*

RESPOSTAS (A, B, C) DOS COMPARADORES DE Tukey					RESPOSTAS (A, B, C) DOS COMPARADORES DE Tukey				
Massa Específica					Módulo de Elasticidade (MOE)				
	A	B	C		A	B	C		
	0,666	0,596	0,559		31239,33	25410,67	21148,83		
C	0,559	0,107**	0,037 ^{ns}	0	C	21148,83	10090,50**	4261,83*	
B	0,596	0,070*	0		B	25410,67	5828,67**	0	
A	0,666	0			A	31239,33	0		
Comparador A 95% = 0,056					Comparador A 95% = 3649,36				

Módulo de Ruptura (MOR)				Tensão no Limite Proporcional (TLP)					
	A	B	C		A	B	C		
	395,17	341,50	294,50		284,33	244,67	214,33		
C	294,50	100,67**	47,00 ^{ns}	0	C	214,33	70,00**	30,33 ^{ns}	0
B	341,50	53,67 ^{ns}	0		B	244,67	39,67*	0	
A	395,17	0			A	284,33	0		
Comparador A 95% = 55,08				Comparador A 95% = 31,99					

A2-13. TESTE DE TUKEY PARA OS VALORES MÉDIOS DA MASSA ESPECÍFICA E DA RESISTÊNCIA À FLEXÃO ESTÁTICA PARALELA ÀS FIBRAS NAS TRÊS POSIÇÕES (A, B e C) DOS COMPENSADOS DE *Pinus elliotii*

Massa Específica			
	A	B	C
	0,627	0,544	0,495
C	0,495	0,132**	0,049 ^{ns}
B	0,544	0,083**	0
A	0,627	0	
Comparador A 95% = 0,042			

Módulo de Elasticidade (MOE)			
	A	B	C
	80830,50	65651,50	49319,83
C	49319,83	31510,67*	16331,67 ^{ns}
B	65651,50	15179,00 ^{ns}	0
A	80830,50	0	
Comparador A 95% = 26755,17			

Módulo de Ruptura (MOR)					Tensão no Limite Proporcional (TLP)				
	A		B	C		A		B	C
	694,17		582,17	462,83		499,17		416,17	322,00
C	462,83	231,33**	119,33 ^{ns}	0	C	322,00	177,17**	94,17 ^{ns}	0
B	582,17	112,00 ^{ns}	0		B	416,17	83,00*	0	
A	694,17	0			A	499,17	0		
Comparador A 95% = 134,75					Comparador A 95% = 112,31				

A2-14. TESTE DE TUKEY PARA OS VALORES MÉDIOS DA MASSA ESPECÍFICA E DA RESISTÊNCIA À FLEXÃO ESTÁTICA PERPENDICULAR ÀS FIBRAS NAS TRÊS POSIÇÕES (A, B e C) DOS COMPENSADOS DE *Pinus elliotii*

Massa Específica			
	A	B	C
	0,620	0,560	0,487
C	0,487	0,133**	0,073**
B	0,560	0,060*	0
A	0,620	0	
Comparador A 95% = 0,052			

Módulo de Elasticidade (MOE)			
	A	B	C
	26642,17	20838,33	17110,83
C	17110,83	9531,33*	3727,50 ^{ns}
B	20838,33	5803,83**	0
A	26642,17	0	
Comparador A 95% = 7306,31			

Módulo de Ruptura (MOR)				
	A	B	C	
	353,50	289,17	232,83	
C	232,83	120,67**	56,33 ^{ns}	0
B	289,17	64,33*	0	
A	353,50	0		
Comparador A 95% = 64,01				

Tensão no Limite Proporcional (TLP)				
	A	B	C	
	221,00	171,50	135,67	
C	135,67	85,33**	35,83 ^{ns}	0
B	171,50	49,50 ^{ns}	0	
A	221,00	0		
Comparador A 95% = 50,31				

A2-15. TESTE DE TUKEY PARA OS VALORES MÉDIOS DA MASSA ESPECÍFICA E DA RESISTÊNCIA À FLEXÃO ESTÁTICA NAS TRÊS POSIÇÕES (A, B e C) DAS LÂMINAS DE *Pinus taeda*

Massa Específica			
	A	B	C
	0,607	0,532	0,468
C	0,468	0,139**	0,064 ^{ns}
B	0,532	0,075*	0
A	0,607	0	
Comparador A 95% = 0,072			

Módulo de Elasticidade (MOE)			
	A	B	C
	81691,33	69832,50	61973,67
C	61973,67	19717,67**	7858,83 ^{ns}
B	69832,50	11858,83*	0
A	81691,33	0	
Comparador A 95% = 11842,67			

Módulo de Ruptura (MOR)				
	A	B	C	
	973,17	871,67	744,33	
C	744,33	228,83**	127,33*	0
B	871,67	101,50 ^{ns}	0	
A	973,17	0		
Comparador A 95% = 124,61				

A2-16. TESTE DE TUKEY PARA OS VALORES MÉDIOS DA MASSA ESPECÍFICA E DA RESISTÊNCIA À FLEXÃO ESTÁTICA NAS TRÊS POSIÇÕES (A, B e C) DAS LÂMINAS DE *Pinus ellottii*

Massa Específica			
	A	B	C
	0,550	0,460	0,420
C	0,420	0,130**	0,040 ^{ns}
B	0,460	0,090**	0
A	0,550	0	
Comparador A 95% = 0,062			

Módulo de Ruptura (MOR)			
	A	B	C
	849,33	689,83	614,33
C	614,33	235,00*	75,50 ^{ns}
B	689,83	159,50 ^{ns}	0
A	849,33	0	
Comparador A 95% = 199,30			

ANEXO 3

**RESULTADOS DE PROPRIEDADES DE RESISTÊNCIA
À FLEXÃO ESTÁTICA TEÓRICAS PARA COMPENSADOS
DE *Pinus taeda* e *Pinus elliottii***

A3-1. RESULTADOS DO MÓDULO DE ELASTICIDADE TEÓRICO PARALELO ÀS FIBRAS (EM kgf/cm^2) DOS COMPENSADOS DE *Pinus taeda* CONSIDERADA TODA A SEÇÃO TRANSVERSAL

Repetição	TRATAMENTO								
	Ext	Ext(a)	Ext(b)	Ext(c)	Ext(d)	Ext(e)	Ext(f)	Ext(g)	Ext(h)
T11A	106880	134128	141791	141676	133955	142282	134528	72850	72526
T11B	67701	76079	69952	68928	75101	69223	75422	52924	51993
T11C	63460	60385	63197	62803	59970	63072	60227	47637	47328
T12A	118125	115549	139439	139434	115365	140031	115859	72289	72088
T12B	80851	134585	128665	128423	134388	128973	134963	58367	57845
T12C	72560	57814	85522	85411	57495	85777	57741	50602	50444
T21A	71609	110260	107262	107394	110415	107853	110887	59422	59448
T21B	68024	110643	102153	102323	110877	102762	111351	57809	57893
T21C	67563	98482	88254	88141	98445	88518	98867	55059	54931
T22A	94617	128198	102174	102081	128300	102518	128849	59462	59301
T22B	69211	98822	96947	96878	98767	97293	99190	58009	57895
T22C	78676	67037	71647	71493	66848	71799	67135	49226	49114
T41A	93678	171976	135337	135600	172514	136181	173252	62169	62147
T41B	77107	90632	108892	108791	90394	109257	90781	52011	51704
T41C	50702	48123	49154	48637	47599	48845	47803	35713	35246
T42A	98730	137795	112384	112591	138193	113073	138784	67121	67275
T42B	86246	94507	80568	80229	94273	80573	94677	58689	58435
T42C	71762	78502	59151	58945	78442	59197	78778	60849	60916
Média	79861	100751	96805	96654	100630	97068	101061	57234	57029
S	16922,77	32986,44	28214,34	28393,66	33234,12	28515,25	33376,44	8857,316	8947,899
C.V.	21,19	32,74	29,15	29,38	33,03	29,38	33,03	15,48	15,69

A3-2. RESULTADOS DO MÓDULO DE ELASTICIDADE TEÓRICO PERPENDICULAR ÀS FIBRAS (EM kgf/cm^2) DOS COMPENSADOS DE *Pinus taeda* CONSIDERADA TODA A SEÇÃO TRANSVERSAL

Repetição	TRATAMENTO								
	Eyt	Eyt(a)	Eyt(b)	Eyt(c)	Eyt(d)	Eyt(e)	Eyt(f)	Eyt(g)	Eyt(h)
T11A	34502	39375	41388	40948	38717	43259	40901	23282	22050
T11B	26843	25433	23824	19922	21706	21046	22931	19351	15808
T11C	22317	18913	19651	18152	17333	19176	18311	15565	14389
T12A	30910	34044	40318	40300	33344	42574	35225	22683	21917
T12B	23511	39591	38036	37118	38842	39212	41033	19575	17587
T12C	19973	17833	25110	24686	16618	26079	17555	15939	15337
T21A	27872	31326	30538	31040	31913	32791	33713	17974	18074
T21B	24520	31155	28926	29574	32047	31243	33855	17280	17602
T21C	22592	28592	25906	25475	28454	26912	30059	17188	16701
T22A	27563	36694	29860	29504	37082	31169	39174	18642	18029
T22B	25424	28755	28263	28001	28547	29580	30157	18037	17602
T22C	23959	20039	21250	20664	19321	21829	20411	15362	14932
T41A	34597	47815	38193	39192	49861	41403	52674	18976	18895
T41B	27373	27034	31829	31444	26127	33218	27601	16891	15720
T41C	16891	15754	16024	14058	13757	14851	14534	12495	10716
T42A	31992	38427	31754	32542	39942	34378	42195	19866	20454
T42B	24793	28138	24477	23189	27248	24497	28785	18731	17766
T42C	21161	22903	17820	17037	22672	17998	23951	18267	18521
Média	25933	29546	28509	27936	29085	29512	30726	18117	17339
S	4831,88	8707,63	7574,73	8206,59	9605,62	8669,58	10147,55	2534,52	2720,46
C.V.	18,63	29,47	26,57	29,38	33,03	29,38	33,03	13,99	15,69

A3-3. RESULTADOS DO MÓDULO DE RUPTURA TEÓRICO PARALELO ÀS FIBRAS (EM kgf/cm²)
DOS COMPENSADOS DE *Pinus taeda* CONSIDERADA TODA SEÇÃO TRANSVERSAL

Repetição	TRATAMENTO												
	Frl	Frl(a1)	Frl(a2)	Frl(a3)	Frl(b1)	Frl(b2)	Frl(b3)	Frl(e1)	Frl(e2)	Frl(e3)	Frl(f1)	Frl(f2)	Frl(f3)
T11A	773	468	926	914	486	926	914	487	929	917	487	929	917
T11B	660	361	581	395	361	582	396	357	576	392	357	576	392
T11C	609	264	462	632	264	462	631	264	461	630	264	461	630
T12A	852	409	828	844	409	827	843	410	830	846	410	830	846
T12B	638	336	774	691	337	774	692	337	776	693	337	776	693
T12C	552	345	641	631	344	638	629	345	640	631	345	640	631
T21A	600	386	665	751	386	665	751	388	668	755	388	668	755
T21B	565	282	599	694	282	599	694	284	603	698	284	603	698
T21C	555	286	502	643	286	503	643	287	504	645	287	504	645
T22A	698	387	639	675	388	641	676	389	643	679	389	643	679
T22B	576	267	545	670	267	545	670	268	547	672	268	547	672
T22C	611	233	463	533	233	463	533	233	464	534	233	464	534
T41A	665	546	753	758	546	754	759	550	759	764	550	759	764
T41B	630	371	633	694	371	632	693	372	634	696	372	634	696
T41C	501	241	437	490	241	437	489	240	434	486	240	434	486
T42A	623	399	739	714	399	740	714	401	744	719	401	744	719
T42B	580	318	529	674	319	530	675	319	530	675	319	530	675
T42C	513	309	346	651	310	347	653	310	347	653	310	347	653
Média	622	346	615	670	346	615	670	347	616	671	347	616	671
S	87,08	82,97	150,05	118,44	83,02	149,86	118,31	83,85	151,37	120,31	83,85	151,37	120,31
C.V.	13,99	23,99	24,42	17,69	24,00	24,38	17,67	24,18	24,57	17,92	24,18	24,57	17,92

A3-4. RESULTADOS DO MÓDULO DE RUPTURA TEÓRICO PERPENDICULAR ÀS FIBRAS (EM kgf/cm²) DOS COMPENSADOS DE *Pinus taeda* CONSIDERADA TODA SEÇÃO TRANSVERSAL

Repetição	TRATAMENTO												
	Frt	Frt(a1)	Frt(a2)	Frt(a3)	Frt(b1)	Frt(b2)	Frt(b3)	Frt(e1)	Frt(e2)	Frt(e3)	Frt(f1)	Frt(f2)	Frt(f3)
T11A	438	224	428	422	224	426	421	229	437	431	229	437	431
T11B	390	178	287	195	180	290	197	168	271	184	168	271	184
T11C	357	126	220	301	126	220	300	124	217	296	124	217	296
T12A	369	189	383	390	187	379	386	193	390	398	193	390	398
T12B	307	156	358	320	156	359	320	159	365	326	159	365	326
T12C	267	163	304	299	159	295	290	162	301	296	162	301	296
T21A	376	175	302	341	175	302	342	182	314	355	182	314	355
T21B	367	128	271	314	128	272	315	133	283	328	133	283	328
T21C	317	131	231	295	132	232	297	135	237	303	135	237	303
T22A	351	177	292	308	179	295	312	183	302	319	183	302	319
T22B	312	123	251	308	123	251	308	126	257	316	126	257	316
T22C	301	109	216	248	108	215	247	110	218	251	110	218	251
T41A	444	245	339	341	247	342	344	258	357	359	258	357	359
T41B	354	173	295	323	171	291	320	175	298	327	175	298	327
T41C	268	118	213	239	117	213	238	113	204	229	113	204	229
T42A	393	180	333	321	181	335	324	189	350	338	189	350	338
T42B	319	148	246	313	150	249	317	150	249	317	150	249	317
T42C	257	142	159	300	145	162	305	146	163	307	146	163	307
Média	344	160	285	310	160	285	310	163	290	316	163	290	316
S	54,62	36,80	67,28	50,85	36,96	66,61	50,35	39,41	71,15	56,55	39,41	71,15	56,55
C.V.	15,89	22,96	23,62	16,40	23,04	23,38	16,23	24,18	24,57	17,92	24,18	24,57	17,92

A3-5. RESULTADOS DA TENSÃO NO LIMITE PROPORCIONAL TEÓRICA PARALELA À FIBRAS (EM kgf/cm²) DOS COMPENSADOS DE *Pinus taeda* CONSIDERADA TODA A SEÇÃO TRANSVERSAL

Repetição	TRATAMENTO								
	Fal	Fal(a1)	Fal(a2)	Fal(b1)	Fal(b2)	Fal(e1)	Fal(e2)	Fal(f1)	Fal(f2)
T11A	632	407	325	407	325	409	326	409	326
T11B	470	345	247	346	248	342	245	342	245
T11C	421	169	178	169	178	168	178	168	178
T12A	704	442	248	441	247	443	248	443	248
T12B	483	379	183	379	183	380	184	380	184
T12C	448	258	238	256	237	257	238	257	238
T21A	458	359	242	359	242	361	244	361	244
T21B	462	320	225	320	225	322	227	322	227
T21C	440	230	175	230	175	231	175	231	175
T22A	535	381	240	382	240	383	241	383	241
T22B	471	303	181	303	181	304	182	304	182
T22C	482	200	144	200	144	200	144	200	144
T41A	557	395	371	395	372	397	374	397	374
T41B	497	332	211	331	211	333	212	333	212
T41C	378	224	113	224	113	223	112	223	112
T42A	540	394	194	394	194	397	196	397	196
T42B	507	334	202	334	202	334	202	334	202
T42C	438	202	191	203	191	203	192	203	192
Média	496	315	217	315	217	316	218	316	218
S	77,34	82,40	60,61	82,44	60,64	83,09	61,11	83,09	61,11
C.V.	15,60	26,15	27,91	26,16	27,91	26,30	28,07	26,30	28,07

A3-6. RESULTADOS DA TENSÃO NO LIMITE PROPORCIONAL TEÓRICA PERPENDICULAR ÀS FIBRAS (EM kgf/cm²) DOS COMPENSADOS DE *Pinus taeda* CONSIDERADA TODA A SEÇÃO TRANSVERSAL

Repetição	TRATAMENTO								
	Fat	Fat(a1)	Fat(a2)	Fat(b1)	Fat(b2)	Fat(e1)	Fat(e2)	Fat(f1)	Fat(f2)
T11A	314	188	150	188	150	192	153	192	153
T11B	265	170	122	172	124	161	115	161	115
T11C	244	81	85	80	85	79	84	79	84
T12A	281	204	115	202	113	208	117	208	117
T12B	211	175	85	176	85	179	86	179	86
T12C	195	122	113	118	110	121	112	121	112
T21A	269	163	110	163	110	170	115	170	115
T21B	255	145	102	145	102	151	107	151	107
T21C	219	106	80	106	81	108	82	108	82
T22A	254	174	109	176	111	180	113	180	113
T22B	231	139	83	139	83	143	86	143	86
T22C	225	93	67	93	67	94	68	94	68
T41A	302	177	167	179	168	187	176	187	176
T41B	272	155	98	153	97	156	99	156	99
T41C	196	110	55	109	55	105	53	105	53
T42A	286	177	87	179	88	186	92	186	92
T42B	234	155	94	157	95	157	95	157	95
T42C	207	93	88	95	90	95	90	95	90
Média	248	146	101	146	101	148	102	148	102
S	35,67	37,03	27,26	37,18	27,35	39,06	28,72	39,06	28,72
C.V.	14,40	25,37	27,09	25,44	27,15	26,30	28,07	26,30	28,07

A3-7. RESULTADOS DO MÓDULO DE ELASTICIDADE TEÓRICO PARALELO (A) E PERPENDICULAR (B) ÀS FIBRAS (EM kgf/cm²) DOS COMPENSADOS DE *Pinus taeda* CONSIDERADA SOMENTE AS LÂMINAS PARALELAS

TRATAMENTO									
A					B				
Repetição	Ext	Exp(a)	Exp(b)	Exp(g)	Repetição	Eyt	Eyp(a)	Eyp(b)	Eyp(g)
T11A	106880	132957	140620	71697	E11A	34502	34918	36931	18825
T11B	67701	74541	68415	51386	E11B	26843	19577	17967	13495
T11C	63460	59524	62335	46776	E11C	22317	15632	16371	12284
T12A	118125	114506	138396	71246	E12A	30910	30072	36346	18711
T12B	80851	133387	127467	57170	E12B	23511	35031	33476	15014
T12C	72560	57067	84775	49885	E12C	19973	14987	22264	13093
T21A	71609	109592	106594	58754	E21A	27872	28782	27994	15430
T21B	68024	110051	101561	57217	E21B	24520	28902	26673	15027
T21C	67563	97712	87484	54289	E21C	22592	25662	22976	14258
T22A	94617	127344	101321	58608	E22A	27563	33444	26609	15392
T22B	69211	98031	96157	57219	E22B	25424	25746	25253	15027
T22C	78676	66351	70961	48540	E22C	23959	17425	18636	12748
T41A	93678	171229	134590	61421	E41A	34597	44969	35347	16131
T41B	77107	89721	10798	51100	E41B	27373	23563	28359	13420
T41C	50702	47244	48275	34835	E41C	16891	12408	12678	9148
T42A	98730	137163	111753	66489	E42A	31992	36023	29349	17462
T42B	86246	93571	79632	57753	E42B	24793	24574	20913	15167
T42C	71762	77858	58506	60205	E42C	21161	20447	15365	15811
Média	79861	99880	95934	56363	Média	25933	26231	25195	14802
S	16922,77	32986,61	28182,20	8843,39	S	4831,88	8663,15	7401,39	2322,51
C.V.	21,19	33,03	29,38	15,69	C.V.	18,63	33,03	29,38	15,69

A3-8. RESULTADOS DO MÓDULO DE RUPTURA TEÓRICO PARALELO (A) E PERPENDICULAR (B) ÀS FIBRAS (EM kgf/cm²) DOS COMPENSADOS DE *Pinus taeda* CONSIDERADA SOMENTE AS LÂMINAS PARALELAS

TRATAMENTO									
A					B				
Repetição	Frl	Frlp(a)	Frlp(b)	Frlp(c)	Repetição	Frt	FrtP(a)	FrtP(b)	FrtP(c)
T11A	773	482	918	906	T11A	438	211	402	379
T11B	660	353	569	387	T11B	390	155	249	170
T11C	609	261	455	623	T11C	357	114	199	272
T12A	852	406	821	836	T12A	369	177	359	366
T12B	638	333	767	685	T12B	307	146	336	300
T12C	552	341	633	623	T12C	267	149	277	273
T21A	600	383	661	746	T21A	376	168	289	327
T21B	565	280	596	690	T21B	367	123	261	302
T21C	555	284	498	638	T21C	317	124	218	279
T22A	698	385	635	671	T22A	351	168	278	294
T22B	576	265	541	664	T22B	312	116	237	291
T22C	611	230	459	527	T22C	301	101	201	231
T41A	665	543	750	755	T41A	444	238	328	330
T41B	630	367	626	687	T41B	354	161	274	301
T41C	501	237	429	481	T41C	268	104	188	210
T42A	623	379	736	710	T42A	393	174	322	311
T42B	580	315	524	667	T42B	319	138	229	292
T42C	513	307	343	645	T42C	257	134	150	283
Média	622	343	609	663	Média	344	150	267	290
S	87,08	82,87	149,60	118,90	S	54,62	36,27	65,48	52,05
C.V.	13,99	24,18	24,57	17,92	C.V.	15,89	24,18	24,57	17,92

A3-9. RESULTADOS DA TENSÃO NO LIMITE PROPORCIONAL TEÓRICA PARALELA (A) E PERPENDICULAR (B) ÀS FIBRAS (EM kgf/cm^2) DOS COMPENSADOS DE *Pinus taeda* CONSIDERADA SOMENTE AS LÂMINAS PARALELAS

TRATAMENTO							
A				B			
Repetição	Falp	Falp(a)	Falp(b)	Repetição	Fatp	Fatp(a)	Fatp(b)
T11A	632	404	322	T11A	314	177	141
T11B	470	338	242	T11B	265	148	106
T11C	421	166	176	T11C	244	73	77
T12A	704	438	246	T12A	281	192	107
T12B	483	375	181	T12B	211	164	79
T12C	448	254	235	T12C	195	111	103
T21A	458	356	241	T21A	269	156	105
T21B	462	318	224	T21B	255	139	98
T21C	440	228	173	T21C	219	100	76
T22A	535	379	238	T22A	254	166	104
T22B	471	300	180	T22B	231	131	79
T22C	482	198	143	T22C	225	87	62
T41A	557	393	370	T41A	302	172	162
T41B	497	239	209	T41B	272	144	92
T41C	378	220	111	T41C	196	96	49
T42A	540	392	193	T42A	286	172	85
T42B	507	330	200	T42B	234	145	87
T42C	438	200	189	T42C	207	88	83
Média	496	312	215	Média	248	137	94
S	77,34	82,12	60,40	S	35,67	35,95	26,44
C.V.	15,60	26,30	28,07	C.V.	14,40	26,30	28,07

A3-10. RESULTADOS DO MÓDULO DE ELASTICIDADE TEÓRICO PARALELO ÀS FIBRAS (EM kgf/cm^2) DOS COMPENSADOS DE *Pinus ellottii* CONSIDERADA TODA A SEÇÃO TRANSVERSAL

Repetição	TRATAMENTO								
	Ext	Ext(a)	Ext(b)	Ext(c)	Ext(d)	Ext(e)	Ext(f)	Ext(g)	Ext(h)
E11A	53524	95735	90622	90098	95249	90484	95657	44515	43832
E11B	40184	49347	65907	65195	48511	65474	48719	29234	28367
E11C	31822	30028	50988	50583	29466	50800	29593	18060	17482
E12A	65727	81551	86721	86634	81425	87005	81774	42638	42401
E12B	50783	43946	59223	58843	43451	59095	43637	28649	28159
E12C	36600	29125	47797	47368	28556	47571	28678	30892	30467
E21A	114254	120849	122847	122703	120690	123228	121207	74916	74731
E21B	86775	85170	70230	69984	85037	70284	85401	64262	64245
E21C	58848	27545	73210	73032	27025	73344	27140	46871	46694
E22A	88579	111237	103675	103243	110861	103686	111336	69053	68654
E22B	64787	61185	59107	58385	60479	58636	60738	50322	49747
E22C	59070	54982	69676	69380	54573	69677	54809	33134	32704
E41A	69334	94484	101069	101082	94448	101515	94852	41065	40802
E41B	77727	87870	75357	74912	87519	75233	87894	36555	35973
E41C	47793	55295	74174	73672	54651	73987	54885	44670	44135
E42A	93565	87645	121823	121407	86972	121927	87344	54050	53352
E42B	73653	81142	85770	85659	80997	86026	81344	48955	48776
E42C	61786	74725	86280	85689	74048	86056	74365	40312	39545
Média	65267	70659	80249	79882	70220	80224	70521	44342	43893
S	21369,82	28050,86	21785,48	21861,41	28180,68	21955,03	28301,36	14677,61	14790,28
C.V.	32,74	39,70	27,15	27,37	40,13	27,37	40,13	33,10	33,70

A3-11. RESULTADOS DO MÓDULO DE ELASTICIDADE TEÓRICO PERPENDICULAR ÀS FIBRAS (EM kgf/cm^2) DOS COMPENSADOS DE *Pinus ellottii* CONSIDERADA TODA A SEÇÃO TRANSVERSAL

Repetição	TRATAMENTO								
	Eyt	Eyt(a)	Eyt(b)	Eyt(c)	Eyt(d)	Eyt(e)	Eyt(f)	Eyt(g)	Eyt(h)
E11A	19828	29379	28037	26041	27530	27510	29083	15928	13326
E11B	15084	17206	21555	18843	14021	19906	14812	11923	8625
E11C	11268	10656	16160	14620	8517	15445	8997	7512	5315
E12A	21304	24014	25372	25040	23534	26452	24862	13794	12891
E12B	16861	14443	18455	17007	12559	17967	13267	10425	8561
E12C	13675	10418	15322	13691	8254	14463	8719	10883	9263
E21A	35346	35489	36014	35465	34883	37465	36851	23426	22721
E21B	28196	25087	21163	20228	24578	21369	25965	19595	19533
E21C	19342	9794	21786	21108	7811	22299	8252	14469	14197
E22A	31504	33470	31485	29840	32042	31524	33850	22392	20873
E22B	20704	20169	19623	16875	17480	17827	18466	17316	15125
E22C	21466	17321	21181	20053	15774	21184	16664	11584	9943
E41A	26529	27437	29166	29216	27298	30864	28838	13408	12405
E41B	22121	26630	23344	21652	25296	22873	26723	13154	10937
E41C	17775	18246	23204	21293	15796	22495	16687	15456	13418
E42A	25342	27699	36676	25090	25137	37070	26556	18876	16221
E42B	22064	23964	25179	24758	23410	26155	24731	15511	14830
E42C	19139	23982	27017	24767	21402	26164	22609	14944	12023
Média	21530	21967	24485	23088	20296	24391	21441	15055	13345
S	6104,74	7685,21	6071,88	6318,58	8145,03	6675,06	8604,55	4136,77	4496,74
C.V.	28,35	34,99	24,80	27,37	40,13	27,37	40,13	27,48	33,70

A3-12. RESULTADOS DO MÓDULO DE RUPTURA TEÓRICO PARALELO ÀS FIBRAS (EM kgf/cm²)
DOS COMPENSADOS DE *Pinus elliottii* CONSIDERADA TODA A SEÇÃO TRANSVERSAL

Repetição	TRATAMENTO												
	Frl	Frl(a1)	Frl(a2)	Frl(a3)	Frl(b1)	Frl(b2)	Frl(b3)	Frl(e1)	Frl(e2)	Frl(e3)	Frl(f1)	Frl(f2)	Frl(f3)
E11A	626	372	695	630	372	696	630	372	695	629	372	695	629
E11B	522	268	446	477	266	444	474	264	441	471	264	441	471
E11C	369	207	334	319	204	331	315	204	329	314	204	329	314
E12A	628	312	598	601	312	597	601	313	599	603	313	599	603
E12B	508	190	398	414	189	396	412	188	395	411	188	395	411
E12C	397	241	387	437	238	383	432	237	381	430	237	381	430
E21A	899	380	725	848	379	725	848	381	728	850	381	728	850
E21B	699	289	472	707	289	472	709	289	473	709	289	473	709
E21C	506	159	479	577	157	471	567	157	472	568	157	472	568
E22A	699	249	713	758	249	714	759	249	714	759	249	714	759
E22B	514	239	404	589	239	405	590	237	401	585	237	401	585
E22C	476	244	444	502	243	442	501	243	442	501	243	442	501
E41A	586	320	610	582	320	610	582	321	612	584	321	612	584
E41B	701	267	511	539	267	512	540	267	511	539	267	511	539
E41C	525	251	500	641	250	497	638	249	496	636	249	496	636
E42A	727	322	638	661	320	636	658	321	636	659	321	636	659
E42B	549	262	594	600	262	594	599	263	595	601	263	595	601
E42C	477	279	543	506	279	542	505	278	540	504	278	540	504
Média	580	269	527	577	269	526	576	269	526	575	269	526	575
S	128,78	57,36	118,73	126,73	57,93	119,74	127,76	58,29	120,74	128,65	58,29	120,74	128,65
C.V.	22,21	21,29	22,51	21,96	21,56	22,77	22,20	21,71	22,97	22,36	21,71	22,97	22,36

A3-13. RESULTADOS DO MÓDULO DE RUPTURA TEÓRICO PERPENDICULAR ÀS FIBRAS (EM kgf/cm²) DOS COMPENSADOS DE *Pinus elliottii* CONSIDERADA TODA A SEÇÃO TRANSVERSAL

Repetição	TRATAMENTO												
	Frt	Frt(a1)	Frt(a2)	Frt(a3)	Frt(b1)	Frt(b2)	Frt(b3)	Frt(e1)	Frt(e2)	Frt(e3)	Frt(f1)	Frt(f2)	Frt(f3)
E11A	318	176	328	297	177	330	299	175	327	296	175	327	296
E11B	230	135	225	241	130	217	231	124	207	221	124	207	221
E11C	177	105	170	162	98	159	151	96	155	148	96	155	148
E12A	309	145	277	278	144	275	277	147	282	283	147	282	283
E12B	270	93	195	203	90	188	196	89	186	193	89	186	193
E12C	211	123	198	224	115	185	209	111	179	202	111	179	202
E21A	432	175	335	392	175	335	391	179	342	400	179	342	400
E21B	356	133	218	327	135	221	332	136	222	333	136	222	333
E21C	259	81	244	294	73	219	264	74	222	267	74	222	267
E22A	391	116	334	355	117	335	356	117	336	357	117	336	357
E22B	279	117	198	289	118	199	290	111	189	275	111	189	275
E22C	250	117	212	240	114	208	235	114	208	235	114	208	235
E41A	347	147	280	267	147	279	266	151	288	275	151	288	275
E41B	330	125	240	253	127	243	256	125	240	253	125	240	253
E41C	253	123	245	314	119	237	304	117	233	299	117	233	299
E42A	324	154	306	317	150	297	308	151	299	310	151	299	310
E42B	270	121	245	278	121	274	277	124	280	283	124	280	283
E42C	247	135	262	245	133	258	241	131	254	237	131	254	237
Média	292	129	252	276	127	248	271	126	247	270	126	247	270
S	64,68	24,69	50,74	54,95	26,36	53,70	57,85	27,40	56,75	60,47	27,40	56,75	60,47
C.V.	22,16	19,13	20,10	19,88	20,79	21,67	21,32	21,71	22,97	22,36	21,71	22,97	22,36

A3-14. RESULTADOS DA TENSÃO NO LIMITE PROPORCIONAL TEÓRICA PARALELA ÀS FIBRAS (EM kgf/cm²) DOS COMPENSADOS DE *Pinus elliottii* CONSIDERADA TODA A SEÇÃO TRANSVERSAL

Repetição	TRATAMENTO								
	Fal	Fal(a1)	Fal(a2)	Fal(b1)	Fal(b2)	Fal(e1)	Fal(e2)	Fal(f1)	Fal(f2)
E11A	394	240	185	240	185	240	185	240	185
E11B	319	168	130	167	129	166	128	166	128
E11C	236	116	98	115	97	115	96	115	96
E12A	450	278	184	278	184	279	184	279	184
E12B	349	165	114	164	113	163	113	163	113
E12C	291	138	136	137	134	136	134	136	134
E21A	637	424	276	424	276	426	277	426	277
E21B	521	234	140	235	140	235	140	235	140
E21C	349	234	89	230	88	231	88	231	88
E22A	529	327	167	328	167	328	167	328	167
E22B	400	176	165	176	166	175	164	175	164
E22C	339	223	130	222	130	222	130	222	130
E41A	430	259	218	259	218	260	219	260	219
E41B	484	262	164	262	165	262	164	262	164
E41C	335	229	136	228	135	228	135	228	135
E42A	555	348	219	347	218	347	218	347	218
E42B	424	267	150	267	150	268	151	268	151
E42C	382	239	176	239	176	238	175	238	175
Média	412	241	160	240	159	240	159	240	159
S	102,49	75,70	46,27	75,97	46,54	76,48	46,83	76,48	46,83
C.V.	24,85	31,48	28,95	31,67	29,19	31,89	29,38	31,89	29,38

A3-15. RESULTADOS DA TENSÃO NO LIMITE PROPORCIONAL TEÓRICA PERPENDICULAR ÀS FIBRAS (EM kgf/cm²) DOS COMPENSADOS DE *Pinus elliottii* CONSIDERADA TODA A SEÇÃO TRANSVERSAL

Repetição	TRATAMENTO								
	Fat	Fat(a1)	Fat(a2)	Fat(b1)	Fat(b2)	Fat(e1)	Fat(e2)	Fat(f1)	Fat(f2)
E11A	172	113	87	114	88	113	87	113	87
E11B	135	85	66	81	63	78	60	78	60
E11C	93	59	50	55	46	54	45	54	45
E12A	196	129	85	128	85	131	87	131	87
E12B	159	81	56	78	54	77	53	77	53
E12C	128	71	70	66	65	64	63	64	63
E21A	285	196	128	196	128	200	130	200	130
E21B	216	108	65	110	66	110	66	110	66
E21C	147	120	46	107	41	108	41	108	41
E22A	270	153	78	154	78	154	78	154	78
E22B	157	86	81	87	81	82	77	82	77
E22C	149	107	62	104	61	104	61	104	61
E41A	198	119	100	119	100	122	103	122	103
E41B	185	123	77	125	78	123	77	123	77
E41C	158	112	66	109	64	107	63	107	63
E42A	205	167	105	162	102	163	102	163	102
E42B	176	124	70	123	69	126	71	126	71
E42C	139	116	85	114	84	112	82	112	82
Média	176	115	76	113	75	113	75	113	75
S	47,85	33,59	20,34	34,33	21,15	35,95	22,01	35,95	22,01
C.V.	27,19	29,24	26,61	30,42	28,15	31,89	29,38	31,89	29,38

A3-16. RESULTADOS DO MÓDULO DE ELASTICIDADE TEÓRICO PARALELO (A) E PERPENDICULAR (B) ÀS FIBRAS (EM kgf/cm²) DOS COMPENSADOS DE *Pinus elliottii* CONSIDERADA SOMENTE AS LÂMINAS PARALELAS

TRATAMENTO									
A					B				
Repetição	Ext	Exp(a)	Exp(b)	Exp(g)	Repetição	Eyt	Eyp(a)	Eyp(b)	Eyp(g)
E11A	53524	94539	89427	43320	E11A	19828	24829	23486	11377
E11B	40184	48150	64710	28036	E11B	15084	12645	16994	7363
E11C	31822	29247	50206	17278	E11C	11268	7681	13186	4538
E12A	65727	80819	85989	41906	E12A	21304	21225	22583	11005
E12B	50783	43128	58404	27830	E12B	16861	11326	15339	7309
E12C	36600	28343	47015	30111	E12C	13675	7444	12348	7908
E21A	114254	119791	12189	72858	E21A	35346	31460	31985	19397
E21B	86775	84403	69463	63495	E21B	28196	22167	18243	16675
E21C	58848	26823	72488	46149	E21C	19342	7045	19037	12120
E22A	88579	110036	102475	67852	E22A	31504	28898	26912	17820
E22B	64787	60029	57951	49166	E22B	20704	15765	15219	12912
E22C	59070	54169	68864	32322	E22C	21466	14226	18085	8488
E41A	69334	93744	100329	40325	E41A	26529	24620	26349	10591
E41B	77727	86867	74355	35553	E41B	22121	22814	19527	9337
E41C	47793	54244	73123	43619	E41C	17775	14246	19204	11456
E42A	93565	86324	120503	52729	E42A	25342	22671	31647	13848
E42B	73653	80394	85021	48207	E42B	22064	21113	22329	12660
E42C	61786	73496	85051	39083	E42C	19139	19302	22337	10264
Média	65267	69697	79287	43380	Média	21530	18304	20823	11393
S	21369,82	27970,79	21698,59	14617,53	S	6104,74	7345,86	5698,62	3838,95
C.V.	32,74	40,13	27,37	33,70	C.V.	28,35	40,13	27,37	33,70

A3-17. RESULTADOS DO MÓDULO DE RUPTURA TEÓRICO PARALELO (A) E PERPENDICULAR (B) ÀS FIBRAS (EM kgf/cm²) DOS COMPENSADOS DE *Pinus elliottii* CONSIDERADA SOMENTE AS LÂMINAS PARALELAS

TRATAMENTO									
A					B				
Repetição	Frl	Frlp(a)	Frlp(b)	Frlp(c)	Repetição	Frt	FrtP(a)	FrtP(b)	FrtP(c)
T11A	626	367	687	622	T11A	318	161	301	272
T11B	522	261	436	466	T11B	230	114	191	204
T11C	369	201	326	310	T11C	177	88	142	136
T12A	628	310	592	596	T12A	309	136	259	261
T12B	508	186	390	406	T12B	270	81	171	178
T12C	397	234	377	425	T12C	211	103	165	186
T21A	899	376	719	840	T21A	432	165	315	368
T21B	699	286	467	701	T21B	356	125	205	307
T21C	506	155	466	562	T21C	259	68	204	246
T22A	699	246	706	750	T22A	391	108	309	328
T22B	514	234	397	578	T22B	279	103	174	253
T22C	476	240	437	495	T22C	250	105	191	217
T41A	586	318	605	577	T41A	347	139	265	253
T41B	701	264	505	533	T41B	330	115	221	233
T41C	525	246	490	629	T41C	253	108	215	275
T42A	727	317	629	651	T42A	324	139	275	285
T42B	549	260	588	594	T42B	270	114	258	260
T42C	477	275	534	498	T42C	247	120	234	218
Média	580	265	520	569	Média	292	116	227	249
S	128,78	57,61	119,53	127,15	S	64,68	25,22	52,23	55,65
C.V.	22,21	21,71	22,97	22,36	C.V.	22,16	21,71	22,97	22,36

A3-18. RESULTADOS DA TENSÃO NO LIMITE PROPORCIONAL TEÓRICA PARALELA (A) E PERPENDICULAR (B) ÀS FIBRAS (EM kgf/cm²) DOS COMPENSADOS DE *Pinus elliottii* CONSIDERADA SOMENTE AS LÂMINAS PARALELAS

TRATAMENTO							
A				B			
Repetição	Falp	Falp(a)	Falp(b)	Repetição	Fatp	Fatp(a)	Fatp(b)
E11A	394	237	183	E11A	172	104	80
E11B	319	164	127	E11B	135	72	55
E11C	236	113	95	E11C	93	50	42
E12A	450	276	182	E12A	196	121	80
E12B	349	162	112	E12B	159	71	49
E12C	291	135	132	E12C	128	59	58
E21A	637	421	274	E21A	285	184	120
E21B	521	232	139	E21B	216	102	61
E21C	349	228	87	E21C	147	100	38
E22A	529	324	165	E22A	270	142	72
E22B	400	173	162	E22B	157	76	71
E22C	339	219	128	E22C	149	96	56
E41A	430	257	216	E41A	198	113	95
E41B	484	259	162	E41B	185	113	71
E41C	335	225	133	E41C	158	98	58
E42A	555	343	215	E42A	205	150	94
E42B	424	265	149	E42B	176	116	65
E42C	382	235	173	E42C	139	103	76
Média	412	237	158	Média	176	104	69
S	102,49	75,59	46,28	S	47,85	33,09	20,26
C.V.	24,85	31,86	29,38	C.V.	27,19	31,89	29,38

ANEXO 4

ANÁLISE DE VARIÂNCIA E TESTE DE TUKEY
DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS TEÓRICAS
DOS COMPENSADOS

A4-1. ANÁLISE DE VARIÂNCIA DO MÓDULO DE ELASTICIDADE TEÓRICO (MOE) PARALELO E PERPENDICULAR ÀS FIBRAS DE COMPENSADOS DE *Pinus taeda* CONSIDERADA TODA A SEÇÃO TRANSVERSAL

Fonte de Variação	G.L.	MOE - PARALELO			MOE - PERPENDICULAR		
		SQ	QM	F	SQ	QM	F
Tratamento	8	48539622488,985	6067452811,123	8,85**	3656749224,708	457093653,088	8,10**
Erro	153	104836730751,324	685207390,532		8638069957,239	56457973,577	
Total	161	153376353240,309			12294819181,947		
F _{tab} (95%, 8,153)	1,94		F _{tab} (99%, 8,153)	2,51			

A4-2. ANÁLISE DE VARIÂNCIA DO MÓDULO DE ELASTICIDADE TEÓRICO (MOE) PARALELO E PERPENDICULAR ÀS FIBRAS DE COMPENSADOS DE *Pinus taeda* CONSIDERADA SOMENTE AS LÂMINAS PARALELAS

Fonte de Variação	G.L.	MOE - PARALELO			MOE - PERPENDICULAR		
		SQ	QM	F	SQ	QM	F
Tratamento	3	21089062815,501	7029687605,167	12,51**	1638959291,290	546319763,763	13,78**
Erro	68	38197947020,649	561734515,010		2695719729,311	39642937,193	
Total	71	59287009836,150			4334679020,601		
F _{tab} (95%, 3,68)	2,75		F _{tab} (99%, 3,68)	4,11			

A4-3. ANÁLISE DE VARIÂNCIA DO MÓDULO DE RUPTURA TEÓRICO (MOR) PARALELO E PERPENDICULAR ÀS FIBRAS DE COMPENSADOS DE *Pinus taeda* CONSIDERADA TODA A SEÇÃO TRANSVERSAL

Fonte de Variação	G.L.	MOR - PARALELO			MOR - PERPENDICULAR		
		SQ	QM	F	SQ	QM	F
Tratamento	12	4433562,495	369463,541	26,22**	1077626,919	89802,243	29,62**
Erro	221	3114319,293	14091,943		670063,119	3031,960	
Total	233	7547881,788			1747690,039		
F _{tab} (95%, 12,221)	1,75		F _{tab} (99%, 12,221)	2,18			

A4-4. ANÁLISE DE VARIÂNCIA DO MÓDULO DE RUPTURA TEÓRICO (MOR) PARALELO E PERPENDICULAR ÀS FIBRAS DE COMPENSADOS DE *Pinus taeda* CONSIDERADA SOMENTE AS LÂMINAS PARALELAS

Fonte de Variação	G.L.	MOR - PARALELO			MOR - PERPENDICULAR		
		SQ	QM	F	SQ	QM	F
Tratamento	3	1155670,392	385223,464	30,23**	360904,772	120301,591	42,60**
Erro	68	866491,256	12742,518		192032,343	2824,005	
Total	71	2022161,648			552937,115		
F _{tab} (95%, 3,68)	2,75		F _{tab} (99%, 3,68)	4,11			

A4-5. ANÁLISE DE VARIÂNCIA DA TENSÃO NO LIMITE PROPORCIONAL TEÓRICA (TLP) PARALELA E PERPENDICULAR ÀS FIBRAS DE COMPENSADOS DE *Pinus taeda* CONSIDERADA TODA A SEÇÃO TRANSVERSAL

Fonte de Variação	G.L.	TLP - PARALELO			TLP - PERPENDICULAR		
		SQ	QM	F	SQ	QM	F
Tratamento	8	1186687,510	148335,939	27,70**	319094,473	39886,809	35,13**
Erro	153	819352,690	5355,246		173712,387	1135,375	
Total	161	2006040,200			492806,860		
F _{tab} (95%, 8,153)	1,94		F _{tab} (99%, 8,153)	2,51			

A4-6. ANÁLISE DE VARIÂNCIA DA TENSÃO NO LIMITE PROPORCIONAL TEÓRICA (TLP) PARALELA E PERPENDICULAR ÀS FIBRAS DE COMPENSADOS DE *Pinus taeda* CONSIDERADA SOMENTE AS LÂMINAS PARALELAS

Fonte de Variação	G.L.	MOE - PARALELO			MOE - PERPENDICULAR		
		SQ	QM	F	SQ	QM	F
Tratamento	2	730649,706	365324,853	66,94**	226420,795	113210,397	104,08*
Erro	51	278341,952	5457,685		55476,308	1087,771	
Total	53	1008991,657			281897,100		
F _{tab} (95%, 2,51)	3,19		F _{tab} (99%, 2,51)	5,07			

A4-7. ANÁLISE DE VARIÂNCIA DO MÓDULO DE ELASTICIDADE TEÓRICO (MOE) PARALELO E PERPENDICULAR ÀS FIBRAS DE COMPENSADOS DE *Pinus elliotii* CONSIDERADA TODA A SEÇÃO TRANSVERSAL

Fonte de Variação	G.L.	MOE - PARALELO			MOE - PERPENDICULAR		
		SQ	QM	F	SQ	QM	F
Tratamento	8	28840905633,831	3605113204,229	6,89**	2206209293,249	275776161,656	6,28**
Erro	153	80025354047,072	523041529,719		6721666196,857	43932458,803	
Total	161	108866259680,902			8927875490,106		
F _{tab} (95%, 8,153)	1,94		F _{tab} (99%, 8,153)	2,51			

A4-8. ANÁLISE DE VARIÂNCIA DO MÓDULO DE ELASTICIDADE TEÓRICO (MOE) PARALELO E PERPENDICULAR ÀS FIBRAS DE COMPENSADOS DE *Pinus elliotii* CONSIDERADA SOMENTE AS LÂMINAS PARALELAS

Fonte de Variação	G.L.	MOE - PARALELO			MOE - PERPENDICULAR		
		SQ	QM	F	SQ	QM	F
Tratamento	3	12460890702,280	4153630234,093	8,64**	1155249941,689	385083313,896	11,13**
Erro	68	32700104568,318	480883890,711		2353502369,150	34610328,958	
Total	71	45160995270,597			3508752310,839		
F _{tab} (95%, 3,68)	2,75		F _{tab} (99%, 3,68)	4,11			

A4-9. ANÁLISE DE VARIÂNCIA DO MÓDULO DE RUPTURA TEÓRICO (MOR) PARALELO E PERPENDICULAR ÀS FIBRAS DE COMPENSADOS DE *Pinus elliotii* CONSIDERADA TODA A SEÇÃO TRANSVERSAL

Fonte de Variação	G.L.	MOR - PARALELO			MOR - PERPENDICULAR		
		SQ	QM	F	SQ	QM	F
Tratamento	12	4161045,595	346753,800	29,44**	969495,282	80791,273	32,25**
Erro	221	2602754,211	11777,168		553657,535	2505,238	
Total	233	6763799,805			1523152,817		
F _{tab} (95%, 12,221)	1,75		F _{tab} (99%, 12,221)	2,18			

A4-10. ANÁLISE DE VARIÂNCIA DO MÓDULO DE RUPTURA TEÓRICO (MOR) PARALELO E PERPENDICULAR ÀS FIBRAS DE COMPENSADOS DE *Pinus elliotii* CONSIDERADA SOMENTE AS LÂMINAS PARALELAS

Fonte de Variação	G.L.	MOR - PARALELO			MOR - PERPENDICULAR		
		SQ	QM	F	SQ	QM	F
Tratamento	3	1176327,113	392109,038	31,18**	302813,556	100937,852	37,93**
Erro	68	855256,881	12577,307		180965,666	2661,260	
Total	71	2031583,994			483779,222		
F _{tab} (95%, 3,68)	2,75		F _{tab} (99%, 3,68)	4,11			

A4-11. ANÁLISE DE VARIÂNCIA DA TENSÃO NO LIMITE PROPORCIONAL TEÓRICA (TLP) PARALELA E PERPENDICULAR ÀS FIBRAS DE COMPENSADOS DE *Pinus elliottii* CONSIDERADA TODA A SEÇÃO TRANSVERSAL

Fonte de Variação	G.L.	TLP - PARALELO			TLP - PERPENDICULAR		
		SQ	QM	F	SQ	QM	F
Tratamento	8	956960,061	119620,008	25,39**	158642,786	19830,348	19,81**
Erro	153	720784,543	4711,010		153195,663	1001,279	
Total	161	1677744,604			311838,449		
Ftab (95%, 8,153)	1,94		Ftab (99%, 8,153)	2,51			

A4-12. ANÁLISE DE VARIÂNCIA DA TENSÃO NO LIMITE PROPORCIONAL TEÓRICA (TLP) PARALELA E PERPENDICULAR ÀS FIBRAS DE COMPENSADOS DE *Pinus elliottii* CONSIDERADA SOMENTE AS LÂMINAS PARALELAS

Fonte de Variação	G.L.	MOE - PARALELO			MOE - PERPENDICULAR		
		SQ	QM	F	SQ	QM	F
Tratamento	2	612473,541	306236,770	50,04**	107348,149	53674,074	42,43**
Erro	51	312118,094	6119,963		64513,218	1264,965	
Total	53	924591,634			171861,366		
Ftab (95%, 2,51)	3,19		Ftab (99%, 2,51)	5,07			

A4-13. TESTE DE TUKEY PARA MÓDULO DE ELASTICIDADE TEÓRICO PARALELO ÀS FIBRAS DOS COMPENSADOS DE *Pinus taeda* CONSIDERADA TODA A SEÇÃO TRANSVERSAL

		Ext (f)	Ext (a)	Ext (d)	Ext (e)	Ext (b)	Ext (c)	Ext	Ext (g)	Ext (h)
		101061	100751	100630	97068	96805	96654	79861	57234	57029
Ext (h)	57029	44032	43722	43601	40039	39776	39625	22832 ^{ns}	205	0
Ext (g)	57234	43827	43517	43396	39834	39571	39420	22627 ^{ns}	0	
Ext	79861	21200 ^{ns}	20890 ^{ns}	20769 ^{ns}	17207 ^{ns}	16944 ^{ns}	16793 ^{ns}	0		
Ext (c)	96654	4407	4097	3976	414	151	0			
Ext (b)	96805	4256	3946	3825	263	0				
Ext (e)	97068	3993	3683	3562	0					
Ext (d)	100630	431	121	0						
Ext (a)	100751	310	0							
Ext (f)	101061	0								

Comparador T 95% = 27086

A4-14. TESTE DE TUKEY PARA MÓDULO DE ELASTICIDADE TEÓRICO PERPENDICULAR ÀS FIBRAS DOS COMPENSADOS DE *Pinus taeda* CONSIDERADA TODA A SEÇÃO TRANSVERSAL

		Eyt (f)	Eyt (a)	Eyt (e)	Eyt (d)	Eyt (b)	Eyt (c)	Eyt	Eyt (g)	Eyt (h)
		30726	29546	29512	29085	28509	27936	25933	18117	17339
Eyt (h)	17339	13387	12207	12173	11746	11170	10597	8594*	778	0
Eyt (g)	18117	12609	11429	11395	10968	10392	9819	7816*	0	
Eyt	25933	4793 ^{ns}	3613 ^{ns}	3579 ^{ns}	3152 ^{ns}	2576 ^{ns}	2003 ^{ns}			
Eyt (c)	27936	2790	1610	1576	1149	573	0			
Eyt (b)	28509	2217	1037	1003	576	0				
Eyt (d)	29085	1641	461	427	0					
Eyt (e)	29512	1214	34	0						
Eyt (a)	29546	1180	0							
Eyt (f)	30726	0								

Comparador T 95% = 7775

A4-15. TESTE DE TUKEY PARA MÓDULO DE ELASTICIDADE TEÓRICO PARALELO (A) E PERPENDICULAR (B) ÀS FIBRAS DOS COMPENSADOS DE *Pinus taeda* CONSIDERADA SOMENTE AS LÂMINAS PARALELAS

A					B				
	Exp (a)	Exp (b)	Ext	Exp(g)	Eyp (a)	Eyt	Eyp(b)	Eyp(g)	
	99880	95934	79861	56363	26231	25933	25195	14802	
Exp (g)	56363	43517	39571	23498*	0	Eyp (g)	14802	11429	11131*
Ext	79861	20019 ^{ns}	16073 ^{ns}	0		Eyp (b)	25195	1036	738 ^{ns}
Exp (b)	95934	3946	0			Eyt	25933	298 ^{ns}	0
Exp (a)	99880	0				Eyp (a)	26231	0	

Comparador T 95% = 27837

Comparador T 95% = 5535

A4-16. TESTE DE TUKEY PARA MÓDULO DE RUPTURA TEÓRICO PARALELO ÀS FIBRAS DOS COMPENSADOS DE *Pinus taeda* CONSIDERADA TODA A SEÇÃO TRANSVERSAL

	Frl(f3)	Frl(e3)	Frl(a3)	Frl(b3)	Frl	Frl(f2)	Frl(e2)	Frl(a2)	Frl(b2)	Frl(f1)	Frl(e1)	Frl(a1)	Frl(b1)	
	671	671	670	670	622	616	616	615	615	347	347	346	346	
Frl (b1)	346	325	325	324	324	276*	270	270	269	269	1	1	0	0
Frl (a1)	346	325	325	324	324	276*	270	270	269	269	1	1	0	
Frl (e1)	347	324	324	323	323	275*	269	269	268	268	0	0		
Frl (f1)	347	324	324	323	323	275*	269	269	268	268	0			
Frl (b2)	615	56	56	55	55	7 ^{ns}	1	1	0	0				
Frl (a2)	615	56	56	55	55	7 ^{ns}	1	1	0					
Frl (e2)	616	55	55	54	54	6 ^{ns}	0	0						
Frl (f2)	616	55	55	54	54	6 ^{ns}	0							
Frl	622	49 ^{ns}	49 ^{ns}	48 ^{ns}	48 ^{ns}	0								
Frl (b3)	670	1	1	0	0									
Frl (a3)	670	1	1	0										
Frl (e3)	671	0	0											
Frl (f3)	671	0												

Comparador T 95% = 131

A4-17. TESTE DE TUKEY PARA MÓDULO DE RUPTURA TEÓRICO PERPENDICULAR ÀS FIBRAS DOS COMPENSADOS DE *Pinus taeda* CONSIDERADA TODA A SEÇÃO TRANSVERSAL

	Frt	Frt(f3)	Frt(e3)	Frt(a3)	Frt(b3)	Frt(f2)	Frt(e2)	Frt(a2)	Frt(b2)	Frt(f1)	Frt(e1)	Frt(a1)	Frt(b1)	
	344	316	316	310	310	290	290	285	285	163	163	160	160	
Frt (b1)	160	184 *	156	156	150	150	130	130	125	125	3	3	0	0
Frt (a1)	160	184 *	156	156	150	150	130	130	125	125	3	3	0	
Frt (e1)	163	181 *	153	153	147	147	127	127	122	122	0	0		
Frt (f1)	163	181 *	153	153	147	147	127	127	122	122	0			
Frt (b2)	285	59 ^{ns}	31	31	25	25	5	5	0	0				
Frt (a2)	285	59 ^{ns}	31	31	25	25	5	5	0					
Frt (e2)	290	54 ^{ns}	26	26	20	20	0	0						
Frt (f2)	290	54 ^{ns}	26	26	20	20	0							
Frt(b3)	310	34 ^{ns}	6	6	0	0								
Frt (a3)	310	34 ^{ns}	6	6	0									
Frt (e3)	316	28 ^{ns}	0	0										
Frt (f3)	316	28 ^{ns}	0											
Frt	344	0												

Comparador T 95% = 61

A4-18. TESTE DE TUKEY PARA MÓDULO DE RUPTURA TEÓRICO PARALELO (A) E PERPENDICULAR (B) ÀS FIBRAS DOS COMPENSADOS DE *Pinus taeda* CONSIDERADA SOMENTE AS LÂMINAS PARALELAS

A						B					
		Frlp(c)	Frl	Frlp(b)	Frlp(a)			Frl	Frlp(c)	Frlp(b)	Frlp(a)
		663	622	609	343			344	290	267	150
Frlp (a)	343	320	279*	266	0	Frlp(a)	150	194*	140	117	0
Frlp (b)	609	54	13 ^{ns}	0		Frlp(b)	267	77 ^{ns}	23	0	
Frl	622	41 ^{ns}	0			Frlp(c)	290	54 ^{ns}	0		
Frlp (c)	663	0				Frl	344	0			

Comparador T 95% = 99

Comparador T 95% = 47

A4-19. TESTE DE TUKEY PARA A TENSÃO NO LIMITE PROPORCIONAL TEÓRICA PARALELA ÀS FIBRAS DOS COMPENSADOS DE *Pinus taeda* CONSIDERADA TODA A SEÇÃO TRANSVERSAL

		Fal	Fal(f1)	Fal(e1)	Fal(a1)	Fal(b1)	Fal(e2)	Fal(f2)	Fal(a2)	Fal(b2)
		496	316	316	315	315	218	218	217	217
Fal (b2)	217	217*	316	218	316	218	1	1	0	0
Fal (a2)	217	279*	99	99	98	98	1	1	0	
Fal (f2)	218	278*	98	98	97	97	0	0		
Fal (e2)	218	278*	98	98	97	97	0			
Fal (b1)	315	181*	1	1	0	0				
Fal (a1)	315	181*	1	1	0					
Fal (e1)	316	180*	0	0						
Fal (f1)	316	180*	0							
Fal	496	0								

Comparador T 95% = 76

A4-20. TESTE DE TUKEY PARA A TENSÃO NO LIMITE PROPORCIONAL TEÓRICA PERPENDICULAR ÀS FIBRAS DOS COMPENSADOS DE *Pinus taeda* CONSIDERADA TODA A SEÇÃO TRANSVERSAL

		Fat	Fat(f1)	Fat(e1)	Fat(a1)	Fat(b1)	Fat(e2)	Fat(f2)	Fat(a2)	Fat(b2)
		248	148	148	146	146	102	102	101	101
Fat (b2)	101	147*	47	47	45	45	1	1	0	0
Fat (a2)	101	147*	47	47	45	45	1	1	0	
Fat (f2)	102	146*	46	46	44	44	0	0		
Fat (e2)	102	146*	46	46	44	44	0			
Fat (b1)	146	102*	2	2	0	0				
Fat (a1)	146	102*	2	2	0					
Fat (e1)	148	100*	0	0						
Fat (f1)	148	100*	0							
Fat	248	0								

Comparador T 95% = 35

A4-21. TESTE DE TUKEY PARA A TENSÃO NO LIMITE PROPORCIONAL TEÓRICA PARALELA (A) E PERPENDICULAR (B) ÀS FIBRAS PARA OS COMPENSADOS DE *Pinus taeda* CONSIDERADA SOMENTE AS LÂMINAS PARALELAS

		A			B				
		Falp	Falp (a)	Frlp(b)			Fatp	Fatp (a)	Fatp(b)
		496	312	215			248	137	94
Falp (b)	215	281*	97	0	Fatp(b)	97	154*	43	0
Falp (a)	312	184*	0		Fatp(a)	137	177*	0	
Falp	496	0			Fatp	248	0		

Comparador T 95% = 60

Comparador T 95% = 27

A4-22. TESTE DE TUKEY PARA MÓDULO DE ELASTICIDADE TEÓRICO PARALELO ÀS FIBRAS DOS COMPENSADOS DE *Pinus elliottii* CONSIDERADA TODA A SEÇÃO TRANSVERSAL

		Ext (b)	Ext (e)	Ext (c)	Ext (a)	Ext (f)	Ext (d)	Ext	Ext (g)	Ext (h)
		80249	80224	79882	70659	70521	70220	65567	44342	43893
Ext (h)	73893	36356	36331	35989	26766	26628	26327	21375 ^{ns}	449	0
Ext (g)	44342	35907	35882	35540	26317	26179	25878	20925 ^{ns}	0	
Ext	65267	14981 ^{ns}	14957 ^{ns}	14614 ^{ns}	5392 ^{ns}	5253 ^{ns}	4953 ^{ns}	0		
Ext (d)	70223	10029	10004	9662	439	301	0			
Ext (f)	70521	9728	9703	9361	138	0				
Ext (a)	70659	9590	8565	8223	0					
Ext (c)	79882	367	342	0						
Ext (e)	80224	25	0							
Ext (b)	80249	0								

Comparador T 95% = 23664

A4-23. TESTE DE TUKEY PARA MÓDULO DE ELASTICIDADE TEÓRICO PERPENDICULAR ÀS FIBRAS DOS COMPENSADOS DE *Pinus elliottii* CONSIDERADA TODA A SEÇÃO TRANSVERSAL

		Eyt (b)	Eyt (e)	Eyt (c)	Eyt (a)	Eyt	Eyt (f)	Eyt (d)	Eyt (g)	Ext (h)
		24485	24391	23088	21967	21530	21441	20296	15055	13345
Eyt (h)	13345	11141	11046	9743	8622	8186*	8096	6951	1711	0
Eyt (g)	15055	9430	9335	8033	6912	6475 ^{ns}	6385	5240	0	
Eyt (d)	20296	4190	4095	2793	1671	1235 ^{ns}	1145	0		
Eyt (f)	21441	3045	2950	1648	526	90 ^{ns}	0			
Eyt	21530	2955 ^{ns}	2860 ^{ns}	1558 ^{ns}	436 ^{ns}	0				
Eyt (a)	21967	2519	2424	1121	0					
Eyt (c)	23088	1397	1303	0						
Eyt (e)	24391	95	0							
Eyt (b)	24485	0								

Comparador T 95% = 6858

A4-24. TESTE DE TUKEY PARA MÓDULO DE ELASTICIDADE TEÓRICO PARALELO (A) E PERPENDICULAR (B) ÀS FIBRAS DOS COMPENSADOS DE *Pinus elliottii* CONSIDERADA SOMENTE AS LÂMINAS PARALELAS

A					B				
	Exp (b)	Exp (a)	Ext	Exp (g)		Eyt	Eyp (b)	Eyp (a)	Eyp (g)
	79287	69697	65267	43380		21530	20823	18304	11393
Exp (g)	43380	35907	26317	21887*	0	Eyp (g)	11393	10138*	9430
Ext	65267	14020 ^{ns}	4430 ^{ns}	0		Eyp (a)	18304	3226 ^{ns}	2519
Exp (a)	69697	9590	0			Eyp (b)	20823	708 ^{ns}	0
Exp (b)	79287	0				Eyt	21530	0	

Comparador T 95% = 19279

Comparador T 95% = 5172

A4-25. TESTE DE TUKEY PARA MÓDULO DE RUPTURA TEÓRICO PARALELO ÀS FIBRAS DOS COMPENSADOS DE *Pinus elliotii* CONSIDERADA TODA A SEÇÃO TRANSVERSAL

	Frl	Frl(a3)	Frl(b3)	Frl(e3)	Frl(f3)	Frl(a2)	Frl(b2)	Frl(e2)	Frl(f2)	Frl(a1)	Frl(b1)	Frl(f1)	Frl(a1)
	580	577	576	575	575	527	526	526	526	269	269	269	269
Frl (e1)	269	311*	308	307	306	306	258	257	257	257	0	0	0
Frl (f1)	269	311*	308	307	306	306	258	257	257	257	0	0	0
Frl (b1)	269	311*	308	307	306	306	258	257	257	257	0	0	
Frl (a1)	269	311*	308	307	306	306	258	257	257	257	0		
Frl (f2)	526	54 ^{ns}	51	50	49	49	1	0	0	0			
Frl (e2)	526	54 ^{ns}	51	50	49	49	1	0	0				
Frl (b2)	526	54 ^{ns}	51	50	49	49	1	0					
Frl (a2)	527	53 ^{ns}	50	49	48	48	0						
Frl (f3)	575	5 ^{ns}	2	1	0	0							
Frl (e3)	575	5 ^{ns}	2	1	0								
Frl (b3)	576	4 ^{ns}	1	0									
Frl (a3)	577	3 ^{ns}	0										
Frl	580	0											

Comparador T 95% = 120

A4-26. TESTE DE TUKEY PARA MÓDULO DE RUPTURA TEÓRICO PERPENDICULAR ÀS FIBRAS DOS COMPENSADOS DE *Pinus elliotii* CONSIDERADA TODA A SEÇÃO TRANSVERSAL

	Frt	Frt(a3)	Frt(b3)	Frt(e3)	Frt(f3)	Frt(a2)	Frt(b2)	Frt(e2)	Frt(f2)	Frt(a1)	Frt(b1)	Frt(f1)	Frt(e1)
	296	276	271	270	270	252	248	247	247	129	127	126	126
Frt (e1)	126	166*	150	145	144	126	122	121	121	3	1	0	0
Frt (f1)	126	166*	150	145	144	126	122	121	121	3	1	0	
Frt (b1)	127	165*	149	144	143	125	121	120	120	2	0		
Frt (a1)	129	163*	147	142	141	123	119	118	118	0			
Frt (f2)	247	45 ^{ns}	29	24	23	23	5	1	0	0			
Frt (e2)	247	45 ^{ns}	29	24	23	23	5	1	0				
Frt (b2)	249	44 ^{ns}	28	23	22	22	4	0					
Frt (a2)	252	40 ^{ns}	24	19	18	18	0						
Frt (f3)	270	22 ^{ns}	6	1	0	0							
Frt (e3)	270	22 ^{ns}	6	1	0								
Frt (b3)	271	21 ^{ns}	5	0									
Frt (a3)	276	16 ^{ns}	0										
Frt	292	0											

Comparador T 95% = 55

A4-27. TESTE DE TUKEY PARA MÓDULO DE RUPTURA TEÓRICO PARALELO (A) E PERPENDICULAR (B) ÀS FIBRAS DOS COMPENSADOS DE *Pinus elliotii* CONSIDERADA SOMENTE AS LÂMINAS PARALELAS

A					B				
	Frl	Frlp (c)	Frlp (b)	Frlp(a)		Frt	Frt p (c)	Frt p (b)	Frt p (a)
	580	569	520	265		292	249	227	116
Frlp(a)	265	315*	304	255	0	Frt p (a)	116	176*	133
Frlp(b)	520	60 ^{ns}	49	0		Frt p (b)	227	65*	22
Frlp(c)	569	11 ^{ns}	0			Frt p (c)	249	43 ^{ns}	0
Frl	580					Frt	292	0	

Comparador T 95% = 99

Comparador T 95% = 45

A4-28. TESTE DE TUKEY PARA A TENSÃO NO LIMITE PROPORCIONAL TEÓRICA PARALELA ÀS FIBRAS DOS COMPENSADOS DE *Pinus elliottii* CONSIDERADA TODA A SEÇÃO TRANSVERSAL

		Fal	Fal(a1)	Fal(b1)	Fal(f1)	Fal(e1)	Fal(a2)	Fal(b2)	Fal(e2)	Fal(f2)
		412	241	240	240	240	160	159	159	159
Fal (b2)	159	253*	82	81	81	81	1	0	0	0
Fal (e2)	159	253*	82	81	81	81	1	0	0	
Fal (f2)	159	253*	82	81	81	81	1	0		
Fal (a2)	160	252*	81	80	80	80	0			
Fal (e1)	240	172*	1	0	0	0				
Fal (f1)	240	172*	1	0	0					
Fal (b1)	240	172*	1	0						
Fal (a1)	241	171*	0							
Fal	412	0								

Comparador T 95% = 71

A4-29. TESTE DE TUKEY PARA A TENSÃO NO LIMITE PROPORCIONAL TEÓRICA PERPENDICULAR ÀS FIBRAS DOS COMPENSADOS DE *Pinus elliottii* CONSIDERADA TODA A SEÇÃO TRANSVERSAL

		Fat	Fat(a1)	Fat(b1)	Fat(f1)	Fat(e1)	Fat(a2)	Fat(b2)	Fat(e2)	Fat(f2)
		176	115	113	113	113	76	75	75	75
Fat (b2)	75	101*	40	38	38	38	1	0	0	0
Fat (e2)	75	101*	40	38	38	38	1	0	0	
Fat (f2)	75	101*	40	38	38	38	1	0		
Fat (a2)	76	100*	39	37	37	37	0			
Fat (e1)	113	63*	2	0	0	0				
Fat (f1)	113	63*	2	0	0					
Fat (b1)	113	63*	2	0						
Fat (a1)	115	61*	0							
Fat	176	0								

Comparador T 95% = 33

A4-30. TESTE DE TUKEY PARA A TENSÃO NO LIMITE PROPORCIONAL TEÓRICA PARALELA (A) E PERPENDICULAR (B) ÀS FIBRAS PARA OS COMPENSADOS DE *Pinus elliottii* CONSIDERADA SOMENTE AS LÂMINAS PARALELAS

		A			B				
		Falp	Falp (a)	Frlp(b)					
		412	237	158					
Falp (b)	158	254*	79	0	Fatp(b)	69	176	104	69
Falp (a)	237	175*	0		Fatp(a)	104	107*	35	0
Falp	412	0			Fatp	176	72*	0	

Comparador T 95% = 63

Comparador T 95% = 29

ANEXO 5

REPRESENTAÇÕES GRÁFICAS DE EQUAÇÕES DE
REGRESSÃO PARA COMPENSADOS DE *Pinus elliottii*

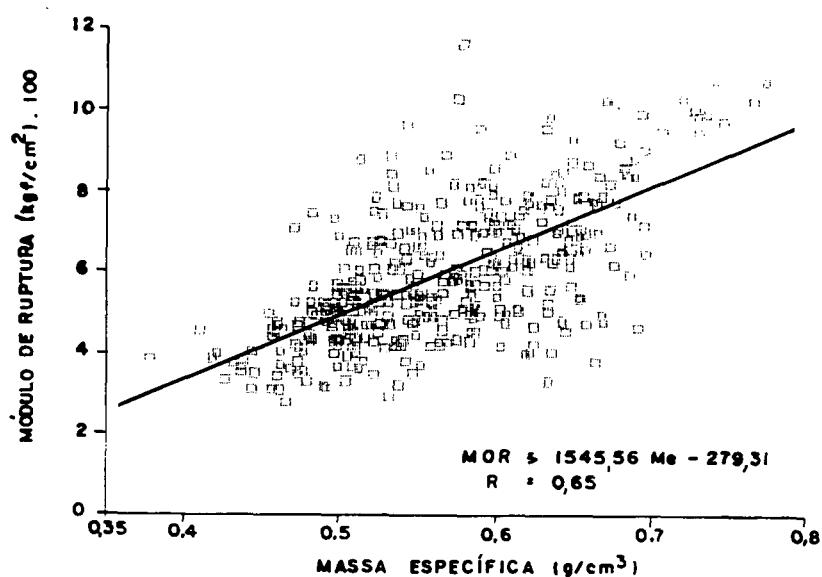
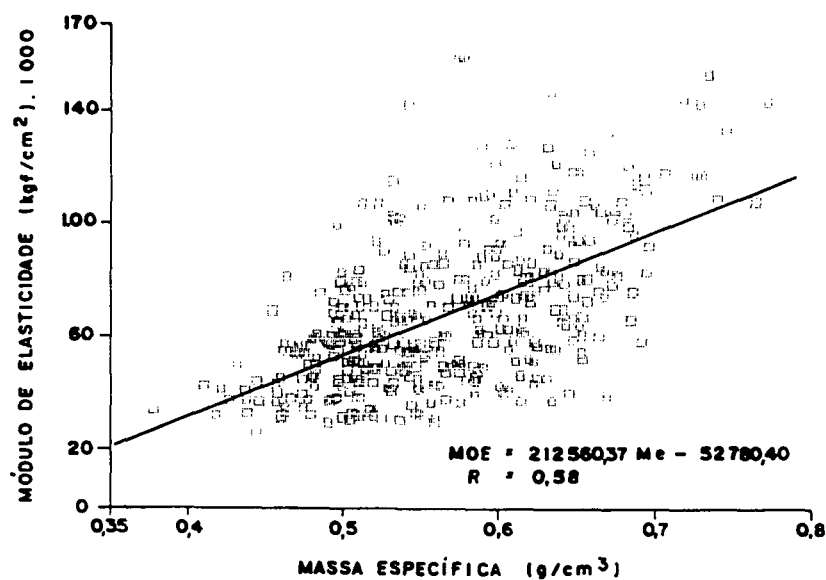


FIGURA 22- REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DAS EQUAÇÕES DE REGRESSÃO SIMPLES, AJUSTADAS PARA O MÓDULO DE ELASTICIDADE, MÓDULO DE RUPTURA E A MASSA ESPECÍFICA PARA COMPENSADOS DE *Pinus elliottii*

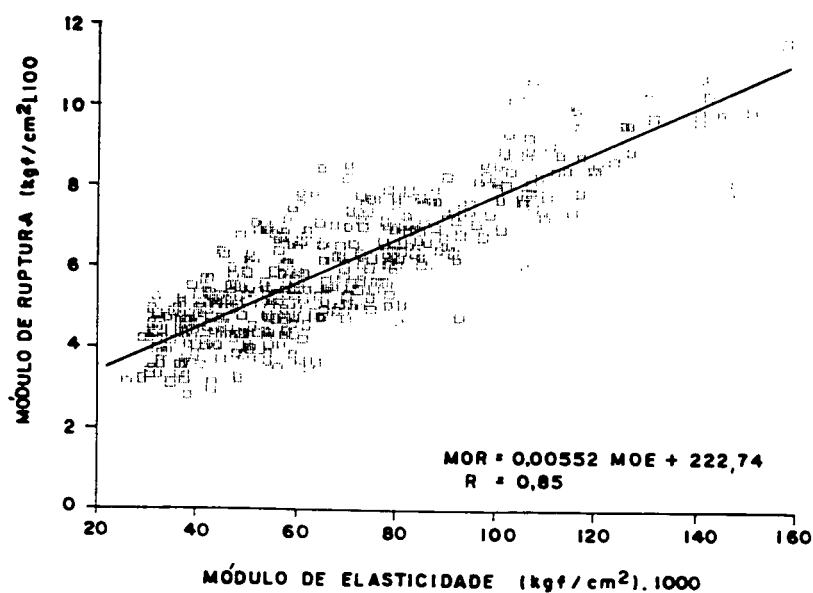
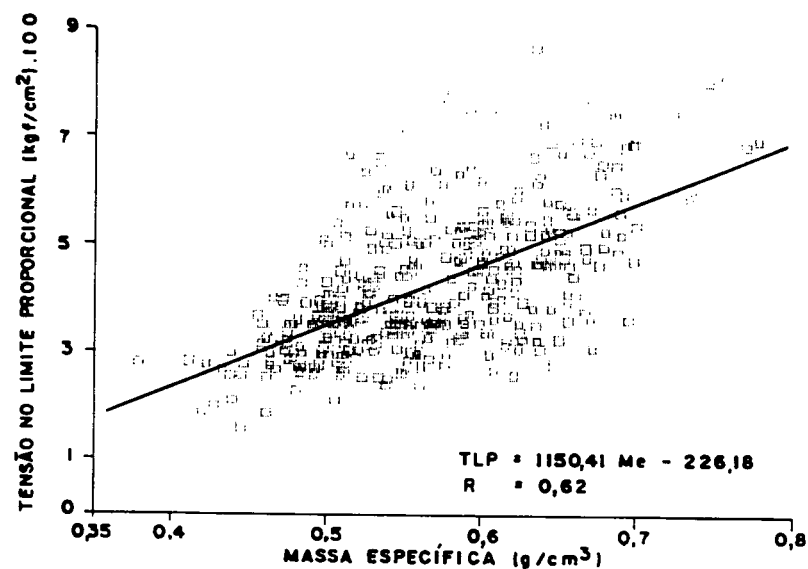


FIGURA 23- REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DAS EQUAÇÕES DE REGRESSÃO SIMPLES, AJUSTADAS PARA A TENSÃO NO LIMITE PROPORCIONAL E A MASSA ESPECÍFICA, E MÓDULO DE RUPTURA E MÓDULO DE ELASTICIDADE PARA COMPENSADOS DE *Pinus elliottii*

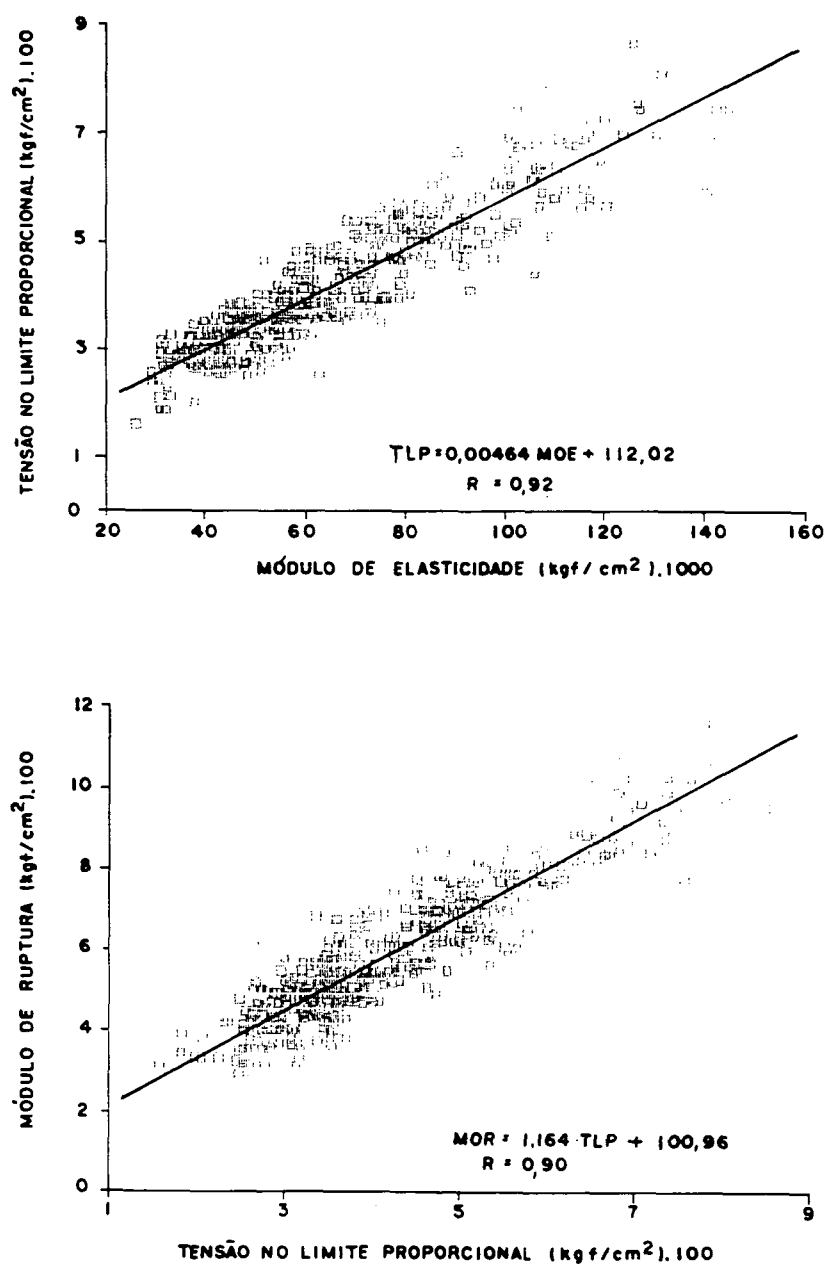


FIGURA 24- REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DAS EQUAÇÕES DE REGRESSÃO SIMPLES, AJUSTADAS PARA A TENSÃO NO LIMITE PROPORCIONAL E O MÓDULO DE ELASTICIDADE, O MÓDULO DE RUPTURA E A TENSÃO NO LIMITE PROPORCIONAL PARA COMPENSADOS DE *Pinus elliottii*

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMERICAN PLYWOOD ASSOCIATIONS (Standard PS 1-83) - Softwood Plywood, Construction and Industrial, 1967.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL (ASTM). Wood, adhesives, part. 22. Philadelphia, 1981.
- BALDWIN, R.F. Plywood manufacturing practices. San Francisco: M. Freeman, 1975. 326p.
- BIBLIS, E.J. An analysis of wood-fiberglass composite beams within and beyond the elastic region. Forest Products Journal, Madison, v.15, n.2, p.81-88, 1965.
- BIBLIS, E.J. Design considerations for laminated wood beams compared of two species Forest Products Journal, Madison, v.16, n.7., p.39-51, 1966.
- BIBLIS, E.J. Flexural rigidity of southern pine plywood. Forest Products Journal, Madison, v.19, n.6., p.47-54, 1969.
- BIBLIS, E.J. Flexural properties of southern yellow pine small beams loaded on true radial and tangential surfaces. Wood Sci. Techn., v.5, p.95-100, 1971.
- BIBLIS, E.J.; LEE, W.C. Simplifications on the experimental method for determining plate shear modulus of plywood and particleboard. Forest Products Journal, Madison, v.26, n.4., p.38-42, 1976.
- BIER, H. Radiata pine plywood - A theoretical prediction of the bending properties of structural plywood. New Zealand Forest Service, FRI Bulletin, n.54, 1983a.
- BIER, H. Radiata pine plywood - An experimental study of the bending properties of structural plywood. New Zealand Forest Service, FRI Bulletin, n.53, 1983b.
- BIER, H. Radiata pine plywood - The strength properties of small clear specimens of plywood. New Zealand Forest Service, FRI Bulletin, n.83, 1984.
- BODIG, J.; GOODMAN, J.R. Prediction of elastic parameters for wood. Wood Science, v.5, n.4, p.249-264, 1973.
- BODIG, J.; JAYNE, B.A. Mechanics of wood and wood composites. New York: Van Nostrand Reinhold, 1982. 711p.
- BOOTH, M.A. Predicting the bending strength of structural plywood. J. Inst. Wood Sci., v.12, n.1, p.14-47, 1990.

- BRAUN, K.M. A glue laminated beam analyzer for conventional or reliability based engineering design. Purdue University (Research Bulletin, 940), 17p., 1977.
- BUNN, E.H. The nature of the resource. New Zealand of Forestry Science, v.26, n.2, p.162-199, 1981.
- CAMARGO, F.A. Densidade e lenho tardio de árvores provenientes de desbastes em povoamento de *Pinus*; Relatório técnico. Piracicaba:CAFMA, 1987.
- CARRASCO, E.V. Resistência, elasticidade e distribuição de tensões nas vigas retas de madeira laminada colada (MLC). São Carlos, 1989. 322p. Tese (Doutorado) - EESC - Universidade de São Paulo.
- CHUGG, W.A. Glulam. London:Ernest Benn, 1964. 423p.
- COMISSÃO PANAMERICANA DE NORMAS TÉCNICAS. (COPANT). São Paulo, Madeiras. São Paulo, 1971.
- CURRY, W.T. The strenght properties of plywood - Effect of the geometry of construction. DSIR Forest Products Research Bulletin, n.33, 1954.
- CURRY, W.T.; HEARMON, R.F.S. The strenght properties of plywood. In: THE PRINCES RISBOROUGH LABORATORY OF THE BUILDING RESEARCH ESTABLISHMENT. The strenght properties of timber. Lancaster:MTP construction, 1974.
- DOUGLAS FIR PLYWOOD ASSOCIATION. Manual of procedures statistical data. Washington, 1960.
- DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (DIN). Prufung von holz. Din 52192. Berlin, 1979.
- ETHINGTON, R.L. Stiffness and bending strength of beam laminated from two species of wood. Madison:USDA. Forest Service, Forest Products Laboratory, 1960. 50p.
- FOREST PRODUCTS LABORATORY. Basic information on wood as a material of construction with data for its use in design and specification. Washington:U.S. Department of Agriculture, 1955. 529p.
- FOREST PRODUCTS LABORATORY. Wood Handbook - Wood as an engineering material. Washington:U.S. Department of Agriculture, 1987. 466p.

- FREAS, A.D. The bending strength and stiffness of plywood. Madison:USDA. Forest Service, FPL Report n.1304. 1956.
- FREAS, A.D. The bending strength and stiffness of plywood. Madison:USDA. Forest Service, FPL Report n.059. 1964. 56p.
- FREAS, A.D.; SELBO, M.L. Fabrication and design of glued laminated wood structural members. Washington:USDA. Forest Service, 1954. 220p. (Technical bulletin, 2061).
- GOODMAN, J.R.; BODIG, J. Orthotropic elastic properties of wood. Journal of the Structural Division, v.96, n.11, p.2031-2319, 1970.
- GURFINKEL, G. Wood engineering. New Orleans:Southern Forest Products Association, 1973. 573p.
- HAYASHIDA, K. Compensado de *Pinus elliottii* e suas propriedades físicas e mecânicas. Relatório Técnico n.6248. São Paulo:IPT, 1972.
- HAYASHIDA, K. Laminação e contraplacado de *Pinus elliottii* Eng. var. *elliottii*. In: CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO (2.:1973: Curitiba). Anais. Curitiba: FIEP, 1973.
- HEARMON, R.F.S.; ADAMS, E.H. The bending and twisting of anisotropic plates. British J. of Applied Physics, n.3, p.150-157, 1952.
- HEGER, L. Longitudinal variation of specific gravity in stems of black spruce, balsam fir and lodgepole pine. Canadian Journal of Forest Research, v.4, n.30, p.321-326, 1974.
- HOWARD, J.; HANSEN, C.E. Modern timber design. New York: John Wiley & Sons, 1962. 312p.
- IBDF - INSTITUTO BRASILEIRO DE DESENVOLVIMENTO FLORESTAL. Normas de controle de qualidade e classificação de compensados. Brasília, 1985.
- JANKOWSKY, I.P. Qualidade das lâminas de *Pinus strobus* (Martinez) var. *chiapensis* obtidas por desenrolamento. In: CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO (3.: 1978. Manaus). Silvicultura, v.2, p.9-12, 1978
- JAYNE, B.A. Models and analyses in the physics of fibrous materials. For. Prod. J., v.16, n.5, p.51-59, 1966.

- JAYNE, B.A.; SUDDARTH, S.K. Matrix-tensor mathematics in orthotropic elasticity. ASTM Special Technical Publication, n.405, p.39-58, 1966.
- KALINKOV, V.; GEORGIEV. Effect of altitude on the wood structure of scots pine in the Rila mountains. Gorskostopanska Nauka, Bulgaria, v.16, n.7, p.305-309, 1979. Apud: Forestry Abstracts, Oxford, v.41, n.10, 1980
- KEENAN, F.J. The shear strenght of glued-laminated timber beams. Toronto, 1973. 290p. Tese (Doutorado) - Department of Civil Engineering - University of Toronto.
- KEINERT Jr., S. Influência de diversos parâmetros nas propriedades de chapas de partículas. Parana Florestal, n.3., p.19-23, 1984.
- KNIGGE, W.; SCHULZ, H. Growndise der Forestbenutzung. Varlang Paul Parey, Hanburg and Berlin, 1966. 584p.
- KOCH, P. Utilization of the southern pines. USDA: Forest Service, 1972. 2.v (Agric. Handbook, 420).
- KOLLMANN, F.F.P.; KUENZI, E.W.; STAMM, A.J. Principles of wood science and technology. Berlin:Springer, 1975, 2v., 1975. 703p.
- KOLLMANN, F.F.P.; COTÊ JUNIOR, W.A. Principles of wood science and technology. Berlin:Springer, 1968, 2v.
- KOLLMANN, F.F.P. Technologie des Holzes und der holzwerkstoffe. Band I. Berlin:Springer Verlag, 1951. 1050p.
- LARA PALMA, H.A. Tanino-formaldehido como adesivo para fabricação de compensados de *Pinus elliottii*. Curitiba, 1986, 123p. Dissertação. Mestrado. Universidade Federal do Paraná. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal.
- LEMA, C.N.; KITALI, M.M.; KLEM, G.S. Basic density and its variation within and between trees of pine (*Pinus pátula*) and cypress (*Cupressus lusitanica*) in the Meru Forest Project. Morogoro: University Dar es Salam, 1978. 11p. Apud:Forest Abstracts, Oxford, v.41, n.5, 1980
- LISKA, J.A. Methods of calculating the strength and modulus of elasticity of plywood in compression. Wiscosin:USDA. Forest Service, FPL Report n.1315. 1955.

- LUTZ, J. How growth rate affects properties of softwood veneer. Forest Products Journal, Madison, v.14, n.3, p.97-102, 1964
- LUTZ, J. Wood and log characteristics affecting veneer production. Madison:USDA. Forest Service Research Paper, FPL - 150. 1971.
- MARCH, H.W. Stress-strain relations in wood and plywood considered as orthotropic materials. Wiscosin:USDA. Forest Service, Forest Products Laboratory, 1944. 24p.
- MARCH, H.W.; KUENZL, E.W.; KOMMERS, W.J. Method of measuring the shearing moduli in wood. Wiscosin:USDA. Forest Service, Forest Products Laboratory, 1942. 10p.
- MARK, R.E.; ADAMS, S.F.; TANG, R.C. Moduli of rigidity of Virginia pine and tulip poplar related to moisture content. Wood Science. Madison, v.2, p.203-211, 1970.
- MARRA, G.G. A materials science approach to wood science. In: INTERNATIONAL SYMPOSIA OF FOREST SCIENCE, Seul, National Academy of Sciences, 1982. p.57-86.
- MARRA, G.G.; YOUNGQUIST, J.A. Wood composites. Chemtech, n.7, p.418-421, 1981.
- McLAIN, T.E.; BODIG, J. Determination of elastic parameters of full-size wood composite boards. Forest Product Journal, Madison, v.24, n.4, p.48-57, 1974.
- McNATT, J.D.; WELLWOOD, R.W.; LARS BACH. Relationships between small-specimen and large panel bending tests on structural wood-based panels. Forest Product Journal, Madison, v.40, n.40, p.10-16, 1990.
- MEDINA, J.C. Efeito da temperatura de aquecimento na obtenção de lâminas por desenrolo e sobre a qualidade da colagem de compensados fenólicos de *Pinus elliottii* Engelm. Curitiba, 1986, 110p. Dissertação. Mestrado. Universidade Federal do Paraná. Setor de Ciências Agrárias. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal.
- MOODY, R.C. Design criteria for large structural glued-laminated timber using mixed species of visually graded lumber. Madison:USDA. Forest Service, FPL, n.236. 1974. 40p.

- MUÑIZ, G.I. Caracterização e desenvolvimento de modelos para estimar as propriedades e o comportamento na secagem da madeira de *Pinus elliottii* Engelm. e *Pinus taeda* L. Curitiba, 1993, 236p. Tese. Doutorado. Universidade Federal do Paraná. Setor de Ciências Agrárias. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal.
- NEWLIN, J.A.; TRAYER, G.W. Deflection beams with special reference to shear deformations. Madison:USDA. Forest Service, FPL n.1309. 1959. 19p.
- NOACK, D.; ROTH, W. von. On the theory of elasticity of the orthotropic material wood. Wood Sci. Techn., v.10, p.97-110, 1976.
- NORRIS, C.B.; McKINNON, P.F. Compression, tension and shear tests on yellow-poplar plywood panels of sizes that do not buckle-tests made at various angles to the face grain. Madison:USDA. Forest Service, FPL, n.1328, 1956. 50p.
- PARKER, H. Simplified design of structural wood. New York:J.Willy, 1979. 269p.
- PEARSON, N.C.; GILMORE, R.C. Characterization of the strenght of juvenile wood of lobolly pine (*Pinus taeda* L.). Forest Products Journal, Madison, v.21, n.1 p.23-31, 1971.
- PEARSON, N.C.; GILMORE, R.C. Effect of fast growth rate on the mecanical properties of lobolly pine. Forest Products Journal, Madison, v.30, n.5 p.47-54, 1980.
- RIBEIRO, G. Determinação de propriedades elásticas e de resistência dos compensados estruturais. São Carlos, 1986, 216p. Dissertação. Mestrado. Universidade de São Paulo. Escola de Engenharia de São Carlos.
- ROCCO LAHR, F.A. Sobre a detrminação de propriedades de elasticidade da madeira. São Carlos, 1983, 221p. Tese. Doutorado. Universidade de São Paulo. Escola de Engenharia de São Carlos.
- SELLERS JUNIOR, T. Factors influencing the wood quality of plantation-grown slash pine. Forest Product Journal, Madison, v.12, n.9, p.443-446. 1962.
- STIEDA, C.K.A. Bending strenght and stiffness of multiple species of plywood. Proceedings. CIB Working Commission W18. Delft, 1974.
- SUCHSLAND, O. Warping of forniture panels. Agric. Exp. Station, Michigan. Extension Bulletin E-745. 1972.

- TOMASELLI, I. Comparação da qualidade da madeira de *Araucaria angustifolia* e *Pinus* sp produzida em reflorestamentos. In: IUFRO Meeting on Forestry Problems of the genus *Araucaria* (...1979, Curitiba) Forestry... Curitiba:FUPEF, 1980. p.286-291.
- TRENDELENBURG, R.; MAYER-WEGELIN, H. Das Holz als Rohstoff. Munchen: Carl Hanser Verlag, 1956. 541p.
- VORREITER, L. Holztechnologiaches handbuch. Band I. Wien: Verlag Georg Fromme, 1949. 548p.
- WELLONS, J.D.; KRAMHER, R.L.; SANTOS, M.D.; JOKERST R.W. Thickness loss in hot-pressed plywood. Forest Product Journal, v.33, n.1, p.27-34, 1983.
- WOODSON, G.E. Modulus of rigidity of rotary-peeled southern pine veneer laminates at various moduli of elasticity. Wood Science, v.6, n.1. p.51-54, 1973.